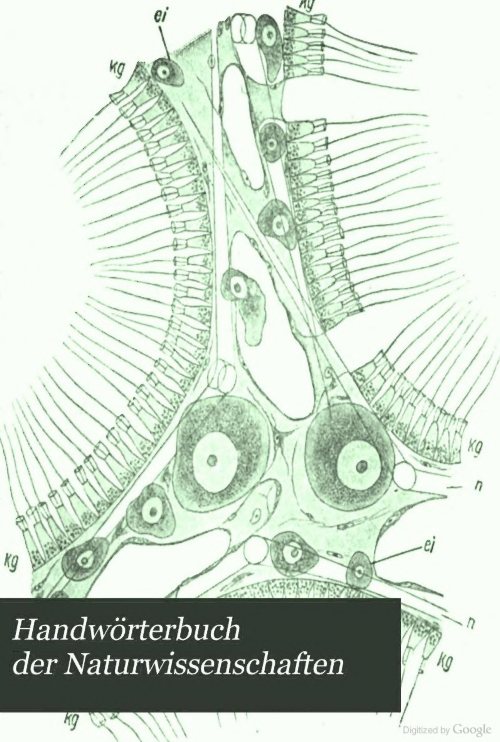


Handwörterbuch der Naturwissenschaften

Digitized by Google

ARTES VERITAS SCIENTIA
LIBRARY OF THE
UNIVERSITY OF MICHIGAN
SI QUAERIS PENINSULAM AMOENAM CIRCUMSPICE

THE GIFT OF
Prof. Alex. Ziwet

Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google

Q
121
.H2

Handwörterbuch der Naturwissenschaften.

Dritter Band.

Digitized by Google

Digitized by Google

Alexander Ziwet

Handwörterbuch
der
Naturwissenschaften

Herausgegeben von

Prof. Dr. E. Korschelt-Marburg (Zoologie)
Prof. Dr. G. Linck-Jena (Mineralogie und Geologie)
Prof. Dr. F. Oltmanns-Freiburg (Botanik)
Prof. Dr. K. Schaum-Leipzig (Chemie)
Prof. Dr. H. Th. Simon-Göttingen (Physik)
Prof. Dr. M. Verworn-Bonn (Physiologie)
Dr. E. Teichmann-Frankfurt a. M. (Hauptredaktion)

Dritter Band

Ei und Eibildung — Fluoreszenz

Mit 921 Abbildungen

JENA
Verlag von Gustav Fischer
1913

Digitized by Google

Alle Rechte vorbehalten.

Copyright 1913 by Gustav Fischer,
Publisher, Jena.

Digitized by Google

Inhaltsübersicht.

Nur die selbständigen Aufsätze sind hier aufgeführt. Eine Reihe von Verweisungen findet sich innerhalb des Textes und ein später herauszugebendes Sachregister wird nähere Auskunft geben.

E.
(Fortsetzung.)

	Seite
Ei und Eibildung. Von Dr. **E. Korschelt,** Prof., Marburg i. H.	1
Eichler, August Wilhelm. Von Dr. **W. Ruhland,** Prof., Halle a. S.	40
Eis. Von Dr. **H. Heß,** Prof., Nürnberg	40
Eisengruppe	57
a) **Eisen.** Von Dr. **F. Sommer,** Charlottenburg	57
b) **Kobalt.** Von Dr. **F. Sommer,** Charlottenburg	68
c) **Nickel.** Von Dr. **F. Sommer,** Charlottenburg	73
Eiszeiten. Von Dr. **M. Semper,** Prof., Aachen	77
Eiweißkörper. Von Dr. **O. Cohnheim,** Prof., Heidelberg	93
Elastizität. Von Dr. **Th. v. Kármán,** Prof., Aachen	165
Elektrizität. Von Dr. **H. Starke,** Prof., Greifswald	193
Elektrische Arbeit. Von Dr. **E. Orlich,** Prof., Berlin-Friedenau	201
Elektrisches Feld. Von Dr. **H. Starke,** Prof., Greifswald	214
Elektrische Hilfsapparate. Von Dr. **H. Schering,** Charlottenburg	227
Elektrische Influenz. Von Dr. **C. Schaefer,** Prof., Breslau	234
Elektrische Leistung. Von Dr. **E. Orlich,** Prof., Berlin-Friedenau	249
Elektrische Maßnormale. Von Dr. **E. Grüneisen,** Charlottenburg	262
Elektrische Maßsysteme. Von **F. Emde,** Prof., Stuttgart	265
Elektrische Spannung. Von Dr. **G. Schulze,** Charlottenburg	275
Elektrischer Strom. Von Dr. **G. Schulze,** Charlottenburg	284
Elektrische Ventile. Von Dr. **G. Schulze,** Charlottenburg	303
Elektrischer Widerstand. Von Dr. **H. Busch,** Göttingen	321
Elektrizitätsleitung. Von Dr. **J. Koenigsberger,** Prof., Freiburg i. B.	347
Elektrizitätsleitung in Gasen. Von Dr. **E. Marx,** Prof., Leipzig	364
Elektrizitätsproduktion. Von Dr. **F. W. Fröhlich,** Prof., Bonn	379
Elektrochemie. Von Dr. **M. Le Blanc,** Prof., Leipzig	396
Elektrodynamik. Von Dr. **H. Scholl,** Prof., Leipzig	408
Elektrokapillarität. Von Dr. **F. Krüger,** Prof., Danzig-Langfuhr	428
Elektrolytische Leitfähigkeit. Von Dr. **A. Coehn,** Prof., Göttingen	441
Elektromotorische Kräfte. Von Dr. **H. Th. Simon,** Prof., Göttingen	449
Elektronen. Von Dr. **G. Mie,** Prof., Greifswald	466
Elektrooptik. Von Dr. **W. Voigt,** Prof., Göttingen	477
Elektrostatische Messungen. Von Dr. **H. Schultze,** Prof., Charlottenburg	483
Endlicher, Stephan Ladislaus. Von Dr. **W. Ruhland,** Prof., Halle	499
Energetik der Organismen. Von Dr. **A. Pütter,** Prof., Bonn	499
Energielehre. Von Dr. **G. Helm,** Prof., Dresden	508
Enteropneusta. Von Dr. **J. W. Spengel,** Prof., Gießen	527

285428

Digitized by Google

Seite

Entwickelungsmechanik oder Entwickelungsphysiologie der Tiere und der Pflanzen . . . 542
A. Entwickelungsmechanik oder Entwickelungsphysiologie der Tiere. Von Dr. C. Herbst, Prof., Heidelberg . . . 542
B. Entwickelungsmechanik oder Entwickelungsphysiologie der Pflanzen. Von Dr. H. Winkler, Prof., Tübingen . . . 634
Enzyme der Pflanzen. Von Dr. F. Czapek, Prof., Prag . . . 667
Epiphyten. Von Dr. G. Karsten, Prof., Halle a. S. . . . 673
Erdbeben. Von A. Sieberg, Straßburg i. E. . . . 687
Erde. Chemischer Bestand der Erde. Von Dr. G. Linck, Prof., Jena . . . 710
Erden. Mineralien mit seltenen Erden. Von Dr. A. Ritzel, Privatdozent, Jena 712
Erdinneres. Von Dr. H. Thiene, Jena . . . 716
Erdmann, Hugo. } Von Dr. E. von Meyer, Prof., Dresden . . . 722
Erdmann, Otto Linné. } Von Dr. E. von Meyer, Prof., Dresden . . . 723
Erdwärme. Von Dr. H. Thiene, Jena . . . 723
Erlenmeyer, Emil. Von Dr. E. von Meyer, Prof., Dresden . . . 731
Erzlagerstätten. Von Dr. A. Bergeat, Prof., Königsberg i. P. . . . 732
Escher von der Linth, Arnold. Von Dr. O. Marschall, Eisenach . . . 769
Eschricht, Daniel Friedrich. } Von Dr. W. Harms, Privatdozent, Marburg 769
Eschscholtz, Johann Friedrich von. } Von Dr. W. Harms, Privatdozent, Marburg 769
Ester. Von Dr. K. H. Meyer, München . . . 770
Euler, Leonhard. Von E. Drude, Göttingen . . . 786
Exkretionsorgane. Von Dr. J. Meisenheimer, Prof., Jena . . . 787
Explantation. Von Dr. A. Oppel, Prof., Halle a. S. . . . 813
Explosionen. Von Dr. G. Just, Prof., Berlin . . . 818

F.

Fahrenheit, Gabriel Daniel. } Von E. Drude, Göttingen . . . 828
Faraday, Michael. } Von E. Drude, Göttingen . . . 828
Farbe. Von Dr. B. Walter, Prof., Hamburg . . . 829
Farben. Von Dr. A. Eibner, Prof., München . . . 851
Farben der Mineralien. Von Dr. R. Brauns, Prof., Bonn . . . 865
Farbstoffe. Von Dr. K. Elbs, Prof., Gießen . . . 871
Farne im weitesten Sinne. Pteridophyta. Von Dr. F. O. Bower, Prof., Glasgow 912
Faserpflanzen. Von Dr. A. Voigt, Prof., Hamburg . . . 991
Faujas de Saint-Fond, Barthélemi. Von Dr. O. Marschall, Eisenach . . . 998
Favre, Pierre Antoine. } Von E. Drude, Göttingen . . . 999
Fechner, Gustav Theodor. } Von E. Drude, Göttingen . . . 999
Fehling, Hermann. Von Dr. E. von Meyer, Prof., Dresden . . . 999
Fermat, Pierre. Von E. Drude, Göttingen . . . 999
Fernphotographie. Telautographie. Phototelegraphie. Fernsehen. Von Dr. P. von Schrott, Wien . . . 1000
Feste Körper. Von Dr. E. Sommerfeld, Prof., Brüssel . . . 1009
Festigkeit. Von Dr. Th. von Kármán, Prof., Aachen . . . 1014
Festland. Von Dr. G. W. von Zahn, Prof., Jena . . . 1030
Fette, Oele, Seifen. Von Dr. H. Großmann, Privatdozent, Berlin . . . 1033
Feuchtigkeit. Von Dr. R. Börnstein, Prof., Wilmersdorf . . . 1049
Fische (Pisces). Von Dr. M. Rauther, Privatdozent, Neapel . . . 1055
— **Paläontologie.** Von Dr. J. F. Pompeckj, Prof., Göttingen . . . 1107
Fittig, Rudolf. Von Dr. E. von Meyer, Prof., Dresden . . . 1147
Fixsternsystem. Von Dr. O. Knopf, Prof., Jena . . . 1148
Fizeau, Armand Hippolyte Louis. Von E. Drude, Göttingen . . . 1173
Flächenmessung. Von Dr. H. von Sanden, Privatdozent, Göttingen . . . 1173
Flagellata. Von Dr. M. Hartmann, Prof., Berlin-Frohnau . . . 1179
Flourens, Marie Jean Pierre. Von Dr. J. Pagel, weil. Prof., Berlin . . . 1226
Fluoreszenz. Von Dr. H. Ley, Prof., Münster . . . 1226

Digitized by Google

E.

(Fortsetzung.)

Ei und Eibildung.

Ei und Geschlechtszellen im allgemeinen. I. Morphologie der Eier: 1. Form, Größe und Zahl der Eier. 2. Struktur der Eier: a) Kern (Keimbläschen). b) Kernkörper (Keimfleck). c) Dotterkern, Sphäre, Mitochondrien usw. d) Eikörper, Ooplasma, Dotter und Dotterbildung, Chromidien. e) Zur Keimzellendetermination in Beziehung stehende Differenzierungen im Ooplasma. 3. Eihüllen. II. Eizelle und Eireifung. III. Eibildung (Oogenese): 1. Die verschiedenen Formen der Eibildung. 2. Solitäre Eibildung. 3. Alimentäre Eibildung: a) Follikuläre Eibildung. b) Nutrimentäre Eibildung. c) Dotterstöcke.

Ei und Geschlechtszellen im allgemeinen. Eier nennt man bei den Tieren die weiblichen Fortpflanzungszellen, welche sich beim Befruchtungsakt mit den männlichen Zellen (Spermatozoen, Spermien) vereinigen, um den neuen Organismus aus sich hervorgehen zu lassen, wozu sie in besonderen Fällen (natürliche oder künstliche Parthenogenesis) auch ohne Hinzutreten einer männlichen Zelle befähigt sind. Besondere, der Fortpflanzung gewidmete Zellen, die sogenannten Propagationszellen, im Gegensatz zu den somatischen oder Somazellen, findet man bei allen Metazoen und entsprechend ihrer verschiedenen Funktion treten sie uns in der bekannten geschlechtlichen Differenzierung entgegen: die Spermatozoen, mit der Aufgabe die weiblichen Zellen zum Vollzug der Befruchtung aufzusuchen, flagellatenförmig gestaltet und von sehr geringer Größe, die Eier hingegen, als ruhende Zellen gewöhnlich von runder Form, für den Ablauf der Entwickelungsvorgänge mit Nährmaterial mehr oder weniger stark belastet und schon aus diesem Grunde, im Vergleich zu den Spermatozoen wie auch zu den Samenzellen, sehr umfangreich.

Eine derartige Differenzierung der Geschlechtszellen und ihre Unterscheidung von anderen, nicht der geschlechtlichen Fortpflanzung dienenden Zellenindividuen ist bereits bei den Protozoen vorhanden. Bei Flagellaten und Protozoen finden sich geißeltragende, ihrer Gestalt wegen direkt als Spermatozoiden bezeichnete, Mikrogameten und andere abgerundete, mit Nährstoffen beladene, zuweilen ungleich viel größere Makrogameten, welche zum Vollzug der Befruchtung von jenen aufgesucht werden, und die man somit wegen der Uebereinstimmung mit den Verhältnissen der Metazoen ohne weiteres als „Eier" bezeichnet hat; es sei nur an das längst bekannte Verhalten des Volvox, sowie an die erst später daraufhin untersuchten Coccidien und Hämosporidien erinnert (vgl. die Artikel „Algen", „Flagellaten" und „Sporozoen"). Bei den vielzelligen Tieren kommen die in der oben gekennzeichneten Weise differenzierten Geschlechtszellen allen Abteilungen, von den niedersten bis zu den höchsten zu, finden sich also von den Schwämmen bis zu den Säugetieren und zwar in ungefähr übereinstimmender Ausbildung, abgesehen von gewissen Abänderungen der Zellformen, wie sie offenbar im Zusammenhang mit der Ausführung des Befruchtungsaktes mehr bei den männlichen als bei den weiblichen Geschlechtszellen in einzelnen Abteilungen des Tierreichs eintreten kann.

I. Morphologie der Eier.

1. Form, Größe und Zahl der Eier. Fast scheint es in der Natur der Eier zu liegen, daß man sich große Zellen von runder, kugliger bis ovaler Form darunter vorstellt, doch braucht sich dies in Wirklichkeit nicht so zu verhalten, denn im jugendlichen Zustand können die Eizellen andere Formen aufweisen. Sie können sich im Verband von Epithelien befinden und sich gegenseitig abplatten, oder eine ganz unregelmäßige Form zeigen, wenn sie verhältnismäßig unabhängig im Gewebe des Körpers liegen, wie es bei den Keimzellen

Digitized by Google

der Schwämme der Fall ist oder bei den Hydroidpolypen, bei welchen die Keimzellen Wanderungen innerhalb der Epithelschichten ausführen. Darauf ist bei der Bildung der Eier zurück zu kommen, wo auch der Begriff Eizelle noch einer genaueren Prüfung zu unterwerfen sein wird; hier soll zunächst nur auf ihre morphologische Beschaffenheit ganz im allgemeinen eingegangen werden und wenn zunächst von Eiern und Eizellen die Rede ist, so wird diese Bezeichnung später noch eine gewisse Modifikation erfahren müssen.

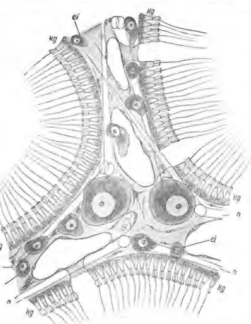


Fig. 1. Kleines Stück eines Schnittes durch den Körper eines Kalkschwammes (Sycandra raphanus) mit dem Krageugeißelepithel (kg) der Radialtuben, dazwischen liegendem Mesodermgewebe mit Kalknadeln (n) und jungen Eizellen (ei) in verschiedenem Ausbildungszustand. Nach F. E. Schulze.

Aus Gründen phylogenetischer Natur erscheint es von Interesse, daß sich der neu entstehende Organismus unter Umständen von einer Zelle herleiten kann, welche die Gestalt einer Amöbe hat. Das gilt für die jungen Eizellen der Schwämme, welche in deren Körperparenchym Ortsveränderungen durchmachen und in ganz ähnlicher Weise auch für die Eier verschiedener Cölenteraten (Hydroiden, Anthozoen Fig. 1 u. 45 A., Dieses Verhalten steht zur Ausbildung der Eier in Beziehung und muß deshalb weiter unten noch besprochen werden, hier sei erwähnt, daß die Eier der genannten Tiere wie eine Amöbe mit pseudopodenartigen Fortsätzen versehen sein können (Fig. 1 und 2). Mit der zunehmenden Ausbildung verlieren auch übrigens solche Eier die Fähigkeit der Pseudopodenbildung und amöboiden Beweglichkeit, runden sich allmählich ab und nehmen damit die gewöhnliche Eiform an, welches Verhalten bereits an eini gen der in Figur 1 abgebildeten Eizellen wahrnehmbar ist. Von letzterer weichen die tierischen Eier im ganzen nur selten ab, wenn nicht die das Ei umgebenden, noch zu erwähnenden Hüllen gewisse Gestaltsveränderungen mit sich bringen. Spindelförmig gestaltet sind z. B. die Eier von Echinorhynchus. Kleinere Abweichungen von der gewöhnlichen, regelmäßigen Gestalt, die an und für sich kaum in die Augen fallen, können insofern recht bedeutungsvoll sein als sie zum Verlauf der Embryonalentwickelung in Beziehung stehen und die spätere Ausbildung des Embryos schon am Ei andeuten. Es kann sich dabei um leichte Streckungen, Abplattungen und dergleichen handeln, die in Verbindung mit gewissen Eigentümlichkeiten der Eistruktur Bedeutung gewinnen. Davon wird weiter unten noch die Rede sein.

Ungemein verschieden ist die Größe der Eier, indem sie sich zwischen mikroskopischer Kleinheit und dem beträchtlichen Umfang eines Vogeleies bewegt. Zur Größe der Tiere selbst steht dieses Verhalten nicht in Beziehung, denn wir wissen, daß die Säugetiere, und zwar auch die größeren unter ihnen, recht kleine Eier haben, der Mensch z. B. solche von 0,2 mm Durchmesser, während kleine

Digitized by Google

Vögel und Reptilien Eier von recht ansehnlichem Umfang hervorbringen, ebenso die Amphibien, z. B. die Frösche Eier von mehreren Millimetern Durchmesser produzieren und das gleiche bei noch weit kleineren Insekten der Fall ist. Der Umfang der Eier wird vielmehr bestimmt durch die Menge der Nährsubstanzen, welche in ihm aufgespeichert werden und die sehr massig sein können, wie es gerade bei den vorher genannten Tieren der Fall ist. Von denjenigen Nährstoffen, welche in der Umgebung des Eies abgelagert werden, wie das Eiweiß des Vogeleies, ist dabei abzusehen, da diese

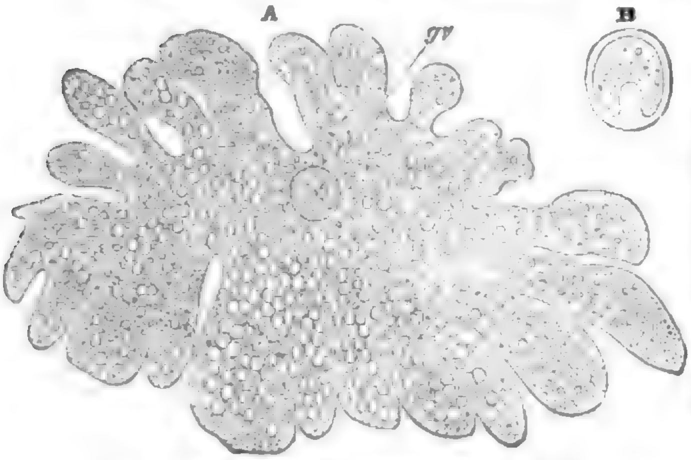


Fig. 2. Ei eines Süßwasserpolypen (Hydra) mit einer sogenannten Pseudozelle (B) daneben, gv Keimbläschen. Nach Kleinenberg.

Substanzen in das Gebiet der Eihüllen gehören.

Die Größe der Eier kann bei ein und demselben Tier insofern verschieden sein, als von ihm Eier verschiedener Dignität hervorgebracht werden, welches Verhalten zwar nicht häufig ist, aber immerhin bei einer Reihe von Tierformen vorkommt. So findet man bei gewissen niederen Krebsen (Daphnoiden) und bei den Rädertieren sogenannte Winter- und Sommereier (Dauer- und Subitaneier), von denen die letzteren sich rasch auf parthenogenetischem Wege (ohne Befruchtung) entwickeln und daher wenig Nährsubstanzen besitzen, während die befruchtungsbedürftigen Winter- oder Dauereier eine längere Ruheperiode durchmachen und längere Zeit zu ihrer Entwickelung bedürfen, daher mit mehr Nährsubstanz versehen, auch durch festere Hüllen als jene geschützt sind. Eier verschiedener Größe bringen auch die Weibchen der Rädertiere hervor, wobei ebenfalls die rasche oder langsame Entwickelungsfähigkeit dieser Eier und infolgedessen ihre bessere Versorgung mit Nährstoffen oder deren Fehlen, oder die leichtere oder festere Umhüllung eine Rolle spielt (dotterreiche, dickschalige, befruchtungsbedürftige Dauereier und dünnschalige, parthenogenetische Subitaneier). Allerdings kommen hier noch andere Faktoren hinzu, indem von manchen Rädertieren größere Eier produziert werden, aus denen Weibchen hervorgehen und kleinere, aus denen sich die bei ihnen weit kleineren Männchen entwickeln, beides kann auf pathenogenetischem Wege geschehen (Maupas, Nußbaum, Whitney, Shull). Freilich scheint diese Einrichtung bei den betreffenden Rädertieren doch nicht so streng durchgeführt zu sein, indem sich unter gewissen äußeren Verhältnissen, besonders Ernährungseinflüssen große Eier auch zu Männchen und kleinere zu Weibchen entwickeln (Nußbaum). Sehr ausgesprochen hingegen ist der Unterschied zwischen großen weiblichen und kleineren männlichen Eiern bei einem den Ringelwürmern zugerechneten Wurm, Dinophilus, in dessem Gelege immer eine Anzahl größerer und eine solche kleinerer Eier abgelegt wird (Fig. 2 a); aus

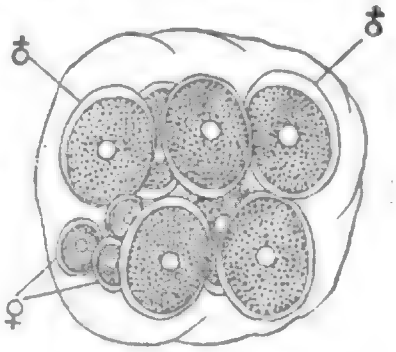


Fig. 2 a. Eikapsel von Dinophilus apatris mit größeren weiblichen und kleineren männlichen Eiern.

ersteren entstehen die Weibchen, aus letzteren die Männchen bei denjenigen Dinophilus-Arten, welche durch den Besitz von Zwergmännchen ausgezeichnet sind (Korschelt, Nelson, Conklin, v. Malsen u. a.). Bemerkenswert erscheint es, daß (bei Dinophilus Conklini nach Beauchamp) die kleinen männlichen Eier auch wegfallen können und dann wie bei den Rädertieren Parthenogenese eintritt; mehrere parthenogenetische Generationen können aufeinanderfolgen.

Bei den Größenunterschieden der von ein und demselben Weibchen hervorgebrachten Eier der genannten Tiere hat es mit Recht ganz besonderes Interesse erregt, daß bei ihnen das Geschlecht der Nachkommen im Ei bereits vorbestimmt erscheint und das gleiche gilt für die ebenfalls an Größe verschiedenen Eier der Reblaus (Phylloxera vastatrix), aus denen sich die beiderlei Geschlechtstiere entwickeln, wie auch sonst die parthenogenetischen Reblausweibchen Eier von ziemlich differenter Größe und Schalenstruktur hervorbringen.

Die Größe der Eier steht begreiflicherweise im direkten Zusammenhang mit der Zahl, in welcher sie von dem betreffenden Tier

Digitized by Google

erzeugt werden; diese richtet sich aber wieder sehr nach dessen Lebensverhältnissen. Wenn die letzteren, zumal im Hinblick auf den Ablauf der Entwickelung, gewissen Schwierigkeiten unterworfen sind, dann steigt die Zahl der von dem einzelnen Individuum hervorgebrachten Eier und deren Umfang verringert sich gleichzeitig. Da die Zahl der Eier ins Ungeheure wachsen kann, so ist es begreiflich, daß die Eier selbst dann eine sehr geringe Größe besitzen. Am besten wird dies durch das Beispiel einiger Tierformen erläutert, die einen ungemein komplizierten Entwickelungsgang aufweisen und bei denen infolgedessen die meisten Eier und Larven zugrunde gehen, ehe einige wenige davon ihr Ziel, den Zustand des geschlechtsreifen Tieres, erreichen. Dies gilt vor allem für parasitisch lebende Tiere, zumal für solche, welche wie die Saug- und Bandwürmer (Trematoden und Cestoden) mehrere Wirtstiere durchlaufen müssen, bevor sie zur Geschlechtsreife gelangen. Im Uterus eines Gliedes (Proglottis) der Bandwurmkette sieht man daher eine Unmenge der kleinen Eier liegen und da der Bandwurm aus Hunderten von Proglottiden besteht, außerdem im Lauf seines Lebens noch weit mehr Glieder produzieren kann, so ist die Zahl der von ihm erzeugten Eier unter Umständen eine ganz enorme. Leuckart berechnet die Zahl der Eier in einer Proglottis von Taenia solium auf 53 000 und da dieser Bandwurm 800 und mehr Glieder im Jahr hervorbringt, so ist die Zahl der von ihm jährlich produzierten Eier auf mindestens 42 Millionen zu schätzen. Eine ähnliche fast ins Unermeßliche gesteigerte Eiproduktion kommt den ebenfalls unter recht ungünstigen Verhältnissen ihre Entwickelung durchlaufenden Spulwürmern (Nematoden) zu und man hat die Zahl der von einem weiblichen Spulwurm jährlich erzeugten Eier sogar auf 64 Millionen berechnet (Eschricht, Leuckart).

Eine große, wenn auch längst nicht so bedeutende Zahl von Eiern bringen die den Bandwürmern verwandten und wie sie unter sehr ungünstigen Entwickelungsververhältnissen lebenden Saugwürmern (Trematoden) hervor und es ist von Interesse, daß die den letzteren recht nahestehenden, aber nicht parasitisch lebenden, Strudelwürmer (Turbellarien) in dieser Hinsicht ganz andere Verhältnisse aufweisen, indem sie ihre Eier von Kapseln (Kokons) umgeben ablegen. In diesen finden die Eier nicht nur Schutz, sondern auch die geeignete Ernährung, so daß sie viel mehr Aussicht haben, zur Entwickelung zu gelangen und diese durchzumachen, so daß die Erhaltung der Art auch bei einer an Zahl ungleich geringeren Eiproduktion gesichert ist.

Aehnliche Verhältnisse finden sich auch bei anderen Tieren und den vorher angegebenen enorm hohen Zahlen sind solche gegenüberzustellen, die eine recht geringe Anzahl jährlich produzierter Eier nennen. Auch bei ihnen steht es damit im Zusammenhang, daß diesen Eiern ein reicheres Nährmaterial mitgegeben wird, daß sie unter günstigeren Verhältnissen abgelegt oder an und im Körper der Mutter, in besonderen Bruträumen oder dergleichen aufbewahrt werden und somit eines weitgehenden Schutzes bei ihrer Entwickelung sich erfreuen. Um nur einige Beispiele zu nennen, gilt dies für die dotterreichen Eier der Haifische, welche in noch zu erwähnenden festen Kapseln (Fig. 27) abgelegt werden oder für die ebenfalls sehr dotterreichen, noch dazu von Eiweiß umgebenen und von festen Hüllen geschützten Vogeleier (Fig. 17), welche die Mutter in einem Nest unterbringt und sorgsam bebrütet. Solche Eier sind besonders gut geschützt und bieten daher alle Garantien für den Ablauf der Entwickelung, so daß nur verhältnismäßig wenig Eier hervorgebracht werden, bei den Vögeln im allgemeinen nicht mehr als 30 im Jahre, von manchen Vogelweibchen noch weniger (die Ueberproduktion von mehreren hundert Eiern im Jahre beim Haushuhn ist nur durch das Halten unter verbesserten Bedingungen hervorgerufen). Man vergleiche damit das Verhalten anderer Wirbeltiere, etwa der Fische, deren Eier ungeschützt frei ins Wasser abgelegt werden und von denen die Weibchen Tausende und Hunderttausende hervorbringen. Im Gegensatz dazu stehen dann auch wieder solche Fischarten, die ihre Eier schützen wie der Stichling, dessen Weibchen nur bis etwa hundert Eier in das vom Männchen bewachte Nest ablegt.

Bekannt ist ferner das Beispiel der höheren Krebse, von denen die im Meer lebenden Hummern und verwandte Formen (Homarus, Palinurus, Scyllarus) verhältnismäßig kleine Eier zu Tausenden hervorbringen, während unser Flußkrebs bestenfalls nur einige Hundert erzeugt. Seine großen dotterreichen Eier bieten jedoch dem Embryo das Material zur vollständigen Durchführung der Entwickelung bis zur Erlangung der Gestalt des ausgebildeten Tieres, während viele andere Krebse das Ei in einer unfertigen Gestalt, d. h. als Larve verlassen und das Material für die Weiterführung ihrer Entwickelung selbst erwerben müssen, dabei jedoch vielen Fährlichkeiten ausgesetzt sind. Hier liegt es also im Interesse der Erhaltung der Art, eine größere Zahl Eier zu produzieren, die dann entsprechend kleiner ausfallen.

Bei manchen niederen Krebsen, wie z. B. Daphnoiden, entwickeln sich die Eier in einem unter der Schale gelegenen und vom

Digitized by Google

mütterlichen Körper mit Nährflüssigkeit versorgtem Brutraum bis ungefähr zur Erlangung der Gestalt des geschlechtsreifen Tieres, dem daraus eine gewisse Belästigung erwächst. Dadurch würde die Eiproduktion schon an und für sich eingeschränkt, wenn nicht infolge der durch den ausgezeichneten Schutz der Eier gewährleisteten besseren Entwickelungsmöglichkeit ihre Zahl von vornherein geringer zu sein brauchte. Die Entwickelung der Eier im Innern des mütterlichen Körpers bedingt überhaupt so wie ihre Ausstattung mit einem reichen Nährmaterial oder die ihnen von seiten der Mutter zugewandte Pflege die Hervorbringung einer geringen Zahl, wofür zuletzt als ein extremes Beispiel noch dasjenige der Säugetiere, zumal der größeren unter ihnen, angeführt sei, Bei ihnen ist zwar die Zahl der im Eierstock erzeugten Eier bei recht geringem Umfange eine ziemlich beträchtliche jedoch gelangen von diesen nur verhältnismäßig wenige zur Reife und noch weniger zur Entwickelung; die Bedingungen, unter denen diese verläuft, sind für die Mutter ganz ungemein schwierige, gewährleisten hierdurch jedoch einen um so größeren Erfolg für die Entwickelung der Nachkommen.

2. Struktur der Eier. Insofern das Ei eine Zelle ist, hat man an ihm den Eikörper, entsprechend dem Protoplasmaleib der Zelle als Ooplasma und den Kern, das sogenannte Keimbläschen, Vesicula germinativa, wie ihn die alten Embryologen (Purkinje 1825) seiner Bläschenform wegen nannten, zu unterscheiden. Dabei ist immer festzuhalten, daß wir von dem nicht gereiften, dem sogenannten Eierstocksei sprechen, an welchem sich die beiden letzten Teilungen der Eireifung erst zu vollziehen haben.

2a) Der Kern (Keimbläschen, das Purkinjesche Bläschen, Vesicula germinativa der alten Embryologen). Fassen wir praktischer Weise zuerst das Keimbläschen ins Auge, so verdankt es diese Bezeichnung seiner Armut an färbbarer, gekörnter Kernsubstanz (Chromatin), abgesehen von dem sogleich zu erwähnenden Nucleolus, wodurch es sich sowohl im lebenden wie im gefärbten Zustand als helle Blase von dem umgebenden dunklen Ooplasma abhebt (Fig. 1 und 3). Gegen letzteres pflegt das Keimbläschen durch eine meist scharf hervortretende Kernmembran abgegrenzt zu sein, freilich ist das nicht unbedingt nötig, sondern nicht selten befindet sich das Keimbläschen in einem Zustand, in welchem seine vorher scharfe Abgrenzung an einem Teil oder auch wohl am ganzen Umfang schwindet und anscheinend ein Uebergang des Keimbläscheninhalts in das umgebende Ooplasma stattfindet. Auch kann die Begrenzung des Keimbläschens wellig oder zackig sein, ebenso wie längere oder kürzere pseudopodenartige Fortsätze an ihm auftreten können (Fig. 4 und 4a), die späterhin wieder eingezogen werden, worauf das Keimbläschen seine frühere regelmäßige Gestalt wieder annimmt. Es scheint, daß das Keimbläschen durch Vergrößerung seiner Oberfläche oder durch Rückbilden der trennenden Grenze eine innigere Verbindung mit dem Ooplasma herstellt (Fig. 4 und 4a) und dadurch der Stoffaustausch zwischen beiden erleichtert wird. Alles dies hat man auf die rege Anteilnahme des Kernes an der aufnehmenden und Nährsubstanz produzierenden Tätigkeit der Eizelle zurückgeführt, wie man auch den Kern anderer Zellen an den verschiedenen Verrichtungen der Zelle (vielleicht leitend) beteiligt sein läßt.

Für diese Annahme spricht ebenfalls die nicht selten am Keimbläschen zu beobachtende Lageveränderung. Im allgemeinen ist ihm eine ungefähr zentrale Lage im Ei zuzuschreiben, wie aus vielen der hier mitgeteilten Bilder hervorgeht, doch kann es diese gelegentlich aufgeben, um mehr nach der Peripherie und zwar vor allem an solche Stellen zu rücken, an denen eine besonders energische Ernährungstätigkeit der Zelle stattfindet, wobei es auch eine Formveränderung erleiden kann (Fig. 4a und Fig. 47). Ist diese erledigt, so nimmt das Keimbläschen seine frühere Lage und Gestalt wieder an.

Die Struktur des Keimbläschens kann zu verschiedenen Zeiten der Eibildung eine recht differente sein, denn nicht immer findet man es arm an geformter Substanz; vielmehr kann diese in Gestalt von Körnern, Strängen und Bändern recht reichlich in ihm vorhanden sein. Zuweilen, wie z. B. bei den jungen Ovarialeiern der Selachier und Amphibien, durchziehen eigenartige Stränge, von denen feinere Fäden ausgehen, das ganze Keimbläschen und erfüllen es ziemlich dicht. Aber diese Zustände wechseln und im allgemeinen tritt die chromatische Substanz im älteren Keimbläschen zurück, wodurch dann eben das helle, bläschenartige Aussehen zustande kommt. Daß die färbbare Substanz später wieder eine Sammlung und Konzentration in Gestalt der Chromosomen (Kernschleifen) bei Ausbildung der ersten Reifungsspindel erfährt, wird später noch zu erwähnen sein, wie auch auf die Beziehungen des Keimbläschens zum Ooplasma zurückzukommen ist.

2b) Kernkörper (Keimfleck). Ein recht auffallendes und doch in seiner Bedeutung schwer zu beurteilendes Gebilde im Keimbläschen ist dessen Kernkörper oder Nucleolus, der sogenannte Keimfleck, die Macula germinativa der älteren Embryologen (R. Wagner 1835). Gewöhnlich als ein im Leben hell, stark lichtbrechend erscheinendes, bei Färbung sich intensiv

Digitized by Google

tingierendes Gebilde, in der Einzahl vorhanden (Fig. 1, 3, 5 und viele der folgenden Figuren), kann der Keimfleck im Leben der Eizelle mancherlei Wandlung durchmachen. Vacuolen können in ihm auftreten und indem sie zusammenfließen größere denen Bestandteilen, die sich bei Färbung recht different verhalten, ist bei den Keimflecken mancher Tiere, z. B. der Lamellibranchiaten, aufgefunden worden (Fig. 6). Nicht immer ist das Keimbläschen nur im Besitz eines Nucleolus, sondern es finden

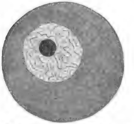


Fig. 3. Ei eines Seesterns im konservierten und gefärbten Zustand mit Keimbläschen und Keimfleck.

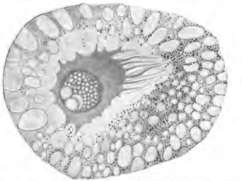


Fig. 4. Keimbläschen mit umgebendem Ooplasma während der Bildung des Dotters von einer Spinne (Pholcus phalangoides). Vom Keimbläschen geht ein Büschel Pseudopodien nach einer Ansammlung von Fettkörnchen. Nach van Bambeke.

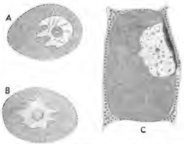


Fig. 4a. Eierstockseier mit unregelmäßig gestalteten (amöboiden) Keimbläschen. A von einem Ringelwurm (Spinther miniaceus), B von einem Haarstern (Antedon rosaceus), C vom Gelbrand (Dytiscus marginalis), letzteres vom Follikelepithel umgeben, dem das Ei an einer Nährsubstanzabscheidung dicht anliegt.

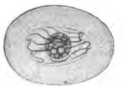


Fig. 5. Keimbläschen mit Keimfleck und Chromatinfaden sowie umgebenden Ooplasma von einem Ringelwurm (Ophryotrocha puerilis).

Hohlräume im Keimfleck bilden, so daß von ihm schließlich nur eine dünne Schale übrig bleibt, die am Ende noch der Auflösung verfällt, welches Schicksal überhaupt früher oder später den Nucleolus des Eies betrifft. In früheren Stadien der Eibildung kann man beobachten, wie der Keimfleck durch Zusammentreten kleinerer Körnchen gebildet wird. Eine Zusammensetzung aus verschie- sich mehrere darin und man hat dann von Haupt- und Nebenkeimflecken gesprochen, indem man ihnen eine verschiedenartige Zusammensetzung und Bedeutung zuschrieb. So wird es ohne weiteres einleuchten, daß dem einen großen, oft sogar ganz besonders umfangreichen Keimfleck eine andere Deutung zukommen mag, als jenen zahlreichen, im Kernraum verteilten, kleineren Kügel-

Digitized by Google

chen, die ebenfalls als Nucleolen angesprochen werden.

Zum Teil handelt es sich bei den sogenannten Nucleolen des Eies überhaupt um Chromatin, welches sich in dieser Form gestaltet und in anderen Zuständen des Kernes, zumal bei der Chromosomenbildung wieder in Chromatinstränge und Bänder übergehen kann. In vielen anderen Fällen

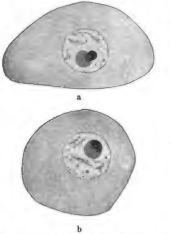


Fig. 6. Eierstockseier von Unio batavus und Limax maximus mit Keimbläschen und Keimfleck, letzterer aus zweierlei Substanz bestehend. Nach Obst.

jedoch ist die Bedeutung und Verwendung der Nucleolen nicht recht ersichtlich; man hat an Reservestoffbehälter, Speicherorgane für die Chromatinbildung im Keimbläschen, aber auch an Abspaltungsprodukte bei der Umbildung der geformten Kernsubstanz, an Sekretstoffe, die im Kern abgelagert wurden (Haecker, Montgomery) und dergleichen gedacht, doch gehören diese schwer lösbaren Fragen mehr in das Gebiet der Zellenlehre, als daß sie hier weiter verfolgt werden könnten (man vgl. O. Hertwig, Gurwitsch, M. Heidenhain).

2c) Dotterkern, Sphäre, Mitochondrien usw. Außer dem eigentlichen Kern, dem Keimbläschen, sind im Eikörper häufig noch andere, freilich ebenfalls dem Wechsel unterworfene und mit der Ausbildung des Eies im Zusammenhang stehende Gebilde vorhanden, von denen vor allen Dingen der sogenannte Dotterkern zu erwähnen ist. Als „Dotterkerne" sind freilich recht verschiedenartige Gebilde beschrieben worden, die sich im Tierreich ziemlich verbreitet finden und sowohl bei wirbellosen wie bei Wirbeltieren vorkommen. Eines der bekanntesten und charakteristischsten Beispiele dafür liefern die Eier der Spinnen. Aus einer dem Keimbläschen des jungen Eierstockes kappenförmig aufsitzenden Anlagerung körniger Substanz (Fig. 7 A) differenziert sich ein heller, mit einem zentralen Kern versehener Körper heraus, der bald eine konzentrische Schicht erkennen läßt (Fig. 7 B und C). Dies

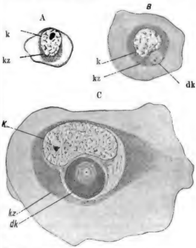


Fig. 7. Eierstockseier einer Spinne (Tegenaria domestica) in verschiedenen Alterstadien mit Keimbläschen (k), Körnchenzone (kz) darum, und Dotterkern (dk). Nach Van der Stricht.

ist hier der ganz besonders scharf umgrenzte, durch eine besondere Struktur ausgezeichnete und daher ungewöhnlich hervortretende sogenannte Dotterkern, der in diesem Fall ungemein beständig ist, indem er nicht nur im Ei auftritt, sondern auf die Furchungsstadien übertragen wird und sich während des größten Teils der Entwickelung, sogar noch in der jungen Spinne vorfinden kann, was insofern möglich ist, als er in die nicht differenzierte Dottermasse des Embryos überging.

Auffallend erscheint es, daß ein so charakteristisches Gebilde in den Eiern der Tiere nicht immer vorhanden ist, sondern bei ganz nahe stehenden Formen fehlt. So findet er sich bei Tegenaria, Lycosa, Salticus u. a., fehlt aber nach Balbani bei Meta und Epeira. Wieder bei anderen

Digitized by Google

Spinnen zeigt er einen völlig abweichenden Bau, indem er einen wurstförmigen, aus körniger Masse bestehenden Körper darstellt, der in der Nähe des Keimbläschens liegt und zu verschiedenen Zeiten der Eibildung eine differente Beschaffenheit besitzt (Fig. 8 A bis D). Er zerfällt am Ende in einzelne Stücke körniger Substanz, die Schnecke (**Arion empiricorum**) herauszugreifen, welche von den genannten beiden Forschern behandelt wurde, so haben die Mitochondrien hier mit der Dotterbildung im Ei zu tun, wovon weiter unten noch die Rede sein wird. Entsprechend den in Verbindung mit dieser auftretenden Ansammlungen geformter Substanzen und gewiß zum Teil

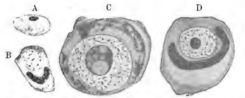


Fig. 8. Eierstockseier in verschiedenen Alterstadien von einer Spinne (Pholcus phalangoides) mit dem sogenannten Dotterkern neben dem Keimbläschen. Nach van Bambeke.

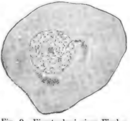


Fig. 9. Eierstocksei eines Fisches (Scorpaena scrofa) mit Austritt einer „Chromatinwolke" aus dem Keimbläschen. Nach van Bambeke aus M. Heidenhains Morphologie und Biologie der Zelle.

sich ihrerseits wieder in kleinere Bestandteile auflösen und am Ende schwinden, indem sie sich im Eidotter verteilen, an dessen Ausbildung der Dotterkern offenbar beteiligt sein kann.

Aehnliche „Dotterkerne" wie in den Eiern der Spinnen sind auch bei anderen Tieren z. B. bei Tausendfüßern (Geophilus) beschrieben worden. Dotterkerne von sehr verschiedener Form und Struktur fanden sich in den Eiern der niedersten wie der höchsten Tierformen, doch unterliegt es keinem Zweifel, daß man recht verschiedenartige Dinge mit diesem Namen belegte. Zum Teil waren es bloße körnige Anhäufungen, die mit der Bildung des Dotters in Beziehung stehen, welche man als Dotterkerne bezeichnete, zum Teil Chromidien oder ähnliche Substanzen, wie sie während der Ausbildung des Eies vom Kern des Ooplasmas abgegeben werden können und sich als körnige Ansammlungen in der Umgebung des Keimbläschens finden (Fig. 9). Als Dotterkerne oder in Verbindung mit ihnen haben gewiß auch **Mitochondrien-Ansammlungen**, wie sie als Anhäufungen körniger, fädiger oder stäbchenförmiger Gebilde in der Umgebung des Keimbläschens auftreten, eine große Rolle gespielt. Van der Stricht, Lams und andere Autoren beschrieben neuerdings Anhäufungen körniger und fädiger Substanzen unabhängig von dem eigentlichen Dotterkern. Um nur zwei und zwar recht verschiedenartige Objekte, nämlich das Säugetierei und das einer damit identisch, abgesehen von der Verschiedenheit der betreffenden Objekte (vgl.

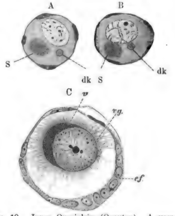


Fig. 10. Junge Ovarialeier (Oocyten). A vom Sperling, B vom neugeborenen Kind, C aus dem Eierstock einer Frau. dk Dotterkern, ef Eifollikel, s Sphäre (die Deutung von Dotterkern und Sphäre bleibe dahingestellt, vgl. den Text), v Mitochondrienschicht, vg Keimbläschen. Nach Mertens und Van der Stricht.

Fig. 13), finden sich die infolge ihrer besonderen Färbung als Mitochondrien zu

Digitized by Google

bezeichnenden Gebilde in der Umgebung des Keimbläschens (Fig. 10) oder auch weiter davon entfernt. Später wandeln sie sich um und verteilen sich im Dotter, an dessen Ausbildung sie sich, wie gesagt, beteiligen, ähnlich wie dies auch von manchen sogenannten Dotterkernen angegeben wurde. Im ganzen Eikörper verbreitet kann jetzt eine große Menge von Balken und Schnüren vorhanden sein, die sich aus sehr kleinen Mitochondrien zusammensetzen (Fig. 11); die Schnüre zeigen im einzelnen sehr verschiedene Formen, verbreitern und verschmälern sich, verschwinden auch in der Umgebung, um dann von neuem zu beginnen (Fig. 11). Späterhin

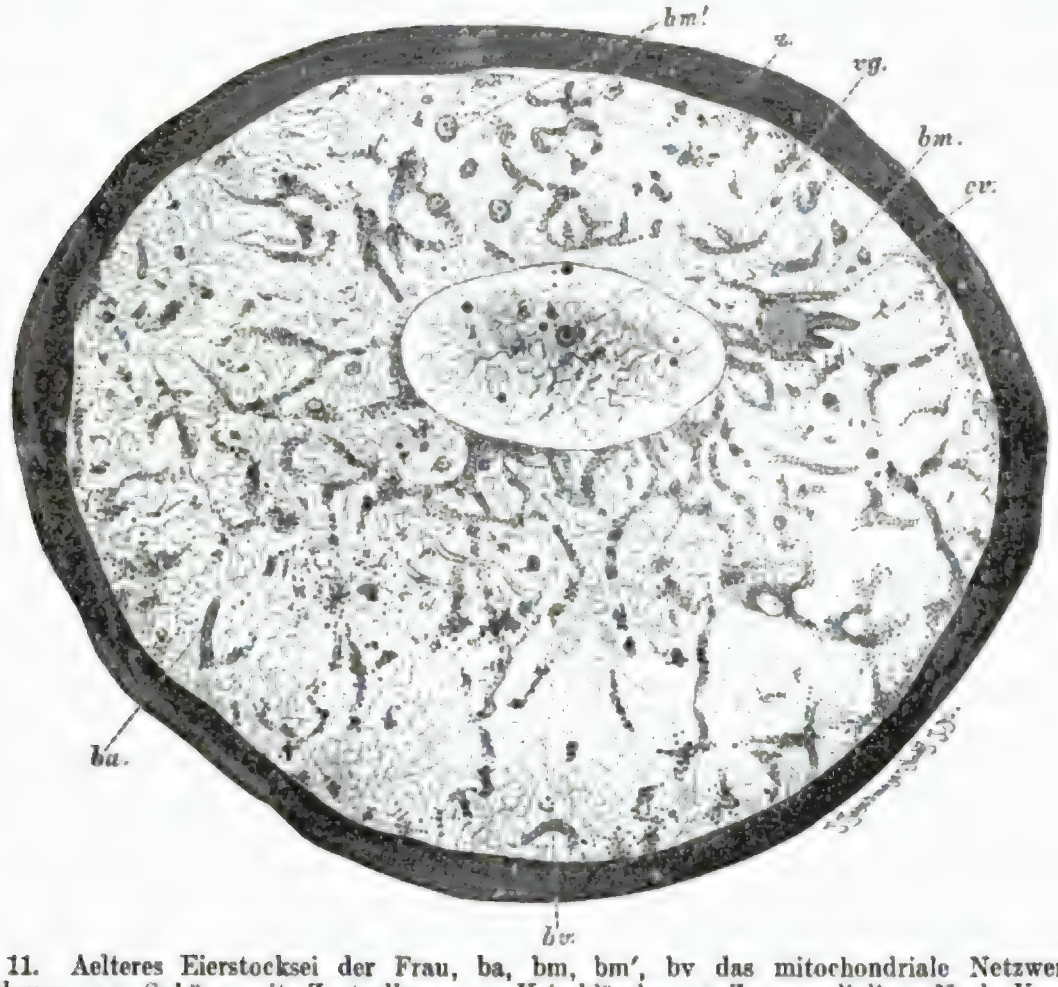


Fig. 11. Aelteres Eierstocksei der Frau, ba, bm, bm', bv das mitochondriale Netzwerk im Oosplasma, cv Sphäre mit Zentralkern, vg Keimbläschen, z Zona radialia. Nach Van der Stricht.

löst sich das gröbere Strangwerk in verstreute Mitochondrien und Chrondromiten auf, die sich ziemlich gleichmäßig im Ooplasma verteilen (van der Stricht, M. Heidenhain). Doch damit gelangen wir schon zur Dotterbildung, auf welche noch einzugehen sein wird.

Die Mitochondrien-Anhäufungen können mit einem anderen bisher noch nicht besprochenen Gebilde in Beziehung stehen, welches ebenfalls zu Verwechselungen mit dem Dotterkern Veranlassung gegeben hat oder direkt als solcher angesehen wurde, nämlich mit der Sphäre, dem Idiozom. Mit dieser Bezeichnung belegt man die um einen Zentralkörper (Centrosoma) mit Zentralkern (Centriol) gelagerten Gebilde, welche durch ein strahliges Gefüge ausgezeichnet sein können oder von dem eine Sphärenstrahlung ausgeht (Fig. 12a). Ihre Entstehung und Bedeutung, zumal ihre Beziehung zur Zellteilung gehört in das Gebiet der Cytologie (vgl. die Artikel „Zelle" und „Zellteilung"), hier sei nur erwähnt, daß Sphären häufig und zwar schon in recht jungen Oocyten vorkommen, wie sie überhaupt eine den Zellen im allgemeinen zukommende, wenn auch nicht immer sichtbar zu machende, aktiv vorhandene Einrichtung darstellen (Fig. 10 bis 11). Gut entwickelte Sphären zeigen dieselben Verhältnisse, wie sie aus anderen Zellen bekannt sind, nämlich die Centrosomen mit ihrer charakteristischen Struktur, eine konzentrische Schichtung und vor allem die sehr deutlich ausgeprägte Strahlung (Fig. 12a). Alles dies tritt oft freilich wenig deutlich hervor und die Sphären machen sich dann nur als körnige Masse mit einem zentralen Kern geltend, doch

spielt dabei auch die Art der Konservierung eine Rolle, je nachdem es gelingt, diese oft nicht leicht zu erhaltenden Dinge wahrnehmbar zu machen. Auch die schon vorher er-

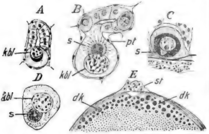


Fig. 12a. Verschiedene Stadien der Eibildung von Limulus. A—D junge Eierstockseier (Oocyten), zum Teil noch in Verbindung mit dem Ovarialepithel, E ältere Oocyte mit kernartigen Gebilden im Dotter (dk), kbl Keimbläschen, pt Peritonealhülle des Eierstocks, s Sphäre, st Stiel des Follikels. Nach Munson.

wähnte Umlagerung der Sphären durch Mitochondrien (Fig. 10) ist dazu angetan, sie weniger deutlich hervortreten zu lassen. Beziehungen des Dotterkerns zu Centrosom und Sphäre, oder seine Herleitung von diesen (Mertens, Winiwarter, Gurwitsch, Hollander u. a.).

Die Frage, inwieweit Dotterkerne und Sphären identische Bildungen sein können, oder die ersteren auf letztere zurückzuführen, als hypertrophische Centrosomen oder Sphären anzusehen sind (Balbiani), kann hier ebensowenig eingehend diskutiert werden, wie die Beziehung zu anderen im Ooplasma vorhandenen Gebilden, den Mitochondrien, Chondromiten, Nebenkernen, Nebenkörpern, Polarringen und wie sie alle heißen. Es sei in dieser Beziehung auf die am Schluß mitgeteilte, sowie auf die cytologische Literatur im allgemeinen verwiesen.

Es scheint, daß „Dotterkerne“ von den bisher besprochenen Gebilden auch unabhängig sein können. So beschreibt v. Voss bei Acanthocephalen (Echinorhynchus) ein anfangs kleines, später immer umfangreicher werdendes Gebilde von kugliger Form und homogener Struktur, welches zuerst unabhängig vom Keimbläschen ist, infolge seines Wachstums sich ihm jedoch schließlich anlegt; späterhin nimmt dieser Dotterkern an Umfang wieder ab. In diesem Falle stellte man sich die Entstehung des „Dotterkerns“ so vor, daß bei lebhafter Materialaufnahme von seiten des Eies diese Stoffe nicht gleich verarbeitet werden konnten, sondern der Ueberschuß als Reservedepot eben im „Dotterkern“ niedergelegt wurde

A B C

Fig. 12b. A—C Chromatinabscheidung aus dem Keimbläschen der jungen Oocyte von Proteus anguineus. Nach Jörgensen.

Zellorganen sind für recht verschiedene Tierformen festgestellt worden, so für Echinodermen (van der Stricht), Würmer (Vejdovsky), Limulus (Munson), Arachnoiden (Balbiani, Hollander), Selachier (Schmidt), Knochenfische (Cunningham), Amphibien (Lams), Vögel und Säugetiere um später mit verbraucht zu werden. Das wäre also eine Beteiligung an der Dotterbildung, wovon noch die Rede sein wird.

Wie man in neuerer Zeit den als Chromidien aus dem Kern stammenden Teilen eine große Bedeutung für die Ausbildung des Eies zuzuschreiben geneigt ist, so hat

Digitized by Google

man auch den Dotterkern ganz oder teilweise darauf zurückgeführt (**Goldschmidt, Jörgensen, Moroff** u. a.). Bemerkenswert ist dabei, daß diese Beobachtungen für ganz verschiedene Formen, z. B. Trematoden, niedere Krebse (Copepoden) und Amphibien gelten. So treten nach **Jörgensen** bei Proteus während des Buketstadiums geformte Chromatinbestandteile aus dem Kern aus, um sich von ihm zu isolieren (Fig. 12b A bis C) und an der Bildung des Dotterkerns teilzunehmen. Nach einer von **Moroff** gegebenen Darstellung erfolgt diese bei Copepoden ebenfalls durch Austritt geformter Gebilde, nämlich ziemlich umfangreicher Körner, aus dem Keimbläschen, die sich nachträglich zu schleifenförmigen, chromosomenartigen Körpern vereinigen und schließlich eine einzige, recht umfangreiche Schleife bilden (Fig. 12c A bis C). Von diesem als „Dotterkern" bezeichneten Gebilde lösen sich dann kleinere oder größere Teile ab (Fig. 12c D), welche sich direkt oder indirekt an der Ausbildung des Eies beteiligen, so daß also auch in diesem Fall eine Anteilnahme an der Dotterbildung vorläge. Gleichzeitig geht der „Dotterkern" seiner Auflösung entgegen.

In den zuletzt beschriebenen Fällen hat man es hinsichtlich ihrer Herkunft und Gestalt mit ganz besonderen Formen von „Dotterkernen" zu tun und es ist klar, daß derartige Dinge mit den vorher geschilderten nicht ohne weiteres vergleichbar sind. Somit geht daraus abermals hervor, daß man als Dotterkerne ganz verschiedene Bildungen im Ooplasma angesprochen hat, wie bereits oben bemerkt wurde.

2d) **Eikörper. Ooplasma. Dotter und Dotterbildung. Chromidien.** Die Organisation des fertigen Eies ist ohne Kenntnis ihres Zustandekommens nicht recht zu verstehen, weshalb, wie schon vorher gelegentlich, so auch in diesem Abschnitt etwas vorgegriffen werden muß. Wenn die Oogonien (vgl. Abschnitt II) ihre Teilungen eingestellt haben, so besitzen diejenigen Zellen, welche später zu Eiern werden (Oocyten wie vorher als Oogonien), zunächst noch einen wenig umfangreichen Protoplasmaleib. Auf dieser Stufe bleiben die Eier nur selten stehen, denn gewöhnlich bedürfen sie für den Vollzug der später an ihnen eintretenden Entwickelungsvorgänge der Einlagerung mehr oder weniger voluminöser Nährsubstanzen in das Ooplasma. Häufig ist diese Einlagerung verhältnismäßig gering und man spricht dann von dotterarmen

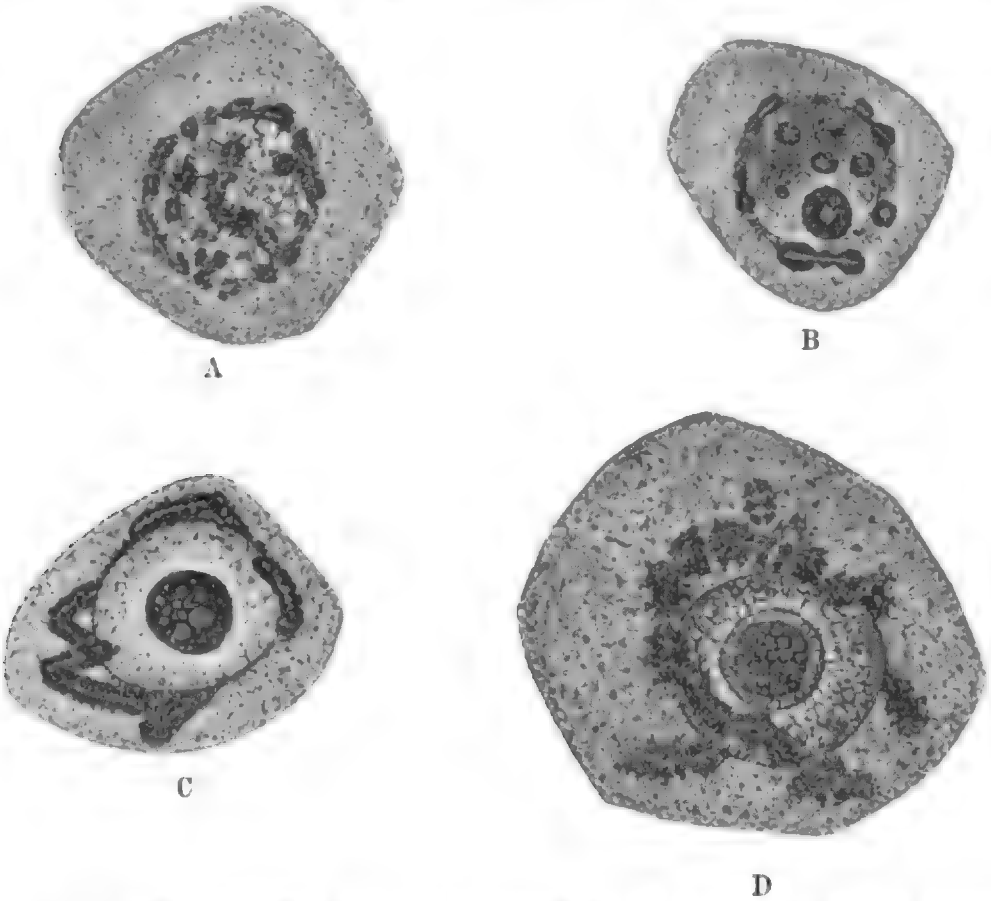


Fig. 12c. A—D Chromatinabgabe aus dem Keimbläschen der jungen Oocyte von **Paracalanus parvus** zur Bildung des Dotterkerns. Nach **Moroff**.

Digitized by Google

Eiern, wie sie in allen Gruppen des Tierreichs von den Schwämmen bis hinauf zu den Wirbeltieren vorkommen. Im ausgebildeten Zustand völlig dotterlose Eier kommen wohl kaum vor und wenn man von „alecithalen“ Eiern spricht, so sind damit solche von sehr geringem Dottergehalt gemeint, denn eine gewisse, wenn auch nur bescheidene Dottermenge brauchen wohl alle Eier zur Entwickelung. Für gewöhnlich ist die Dottereinlagerung wie gesagt stärker und erreicht unter Umständen einen sehr bedeutenden Umfang, wie dies z. B. bei den ungemein dotterreichen Eiern vieler Insekten, Tintenfische, Haifische, Knochenfische, Reptilien und Vögel der Fall ist.

Mit dem Aufhören der Teilung beginnt also ein unverhältnismäßig starkes Wachstum der Eizelle und es frägt sich, wodurch dieses zu erklären ist. Das Verhalten des Kernes kann zunächst den Eindruck erwecken, als ob die Zelle nochmals in die Teilung eintreten wolle, was sie in einem späteren Stadium wirklich tut (Reifungsteilung vgl. II. Abschnitt). Die färbbare Substanz des Kernes kann sich von neuem zu chromosomartigen Schleifen anordnen, wodurch das bei ganz verschiedenen Tierformen (Spongien, Coelenteraten, Amphibien u. a.) beobachtete sogenannte Buketstadium (Fig. 12 b) zustande kommt. Wenn es sich hierbei um die Vorbereitung zu einer Teilung handelte, so wird diese jedoch unterdrückt und das Chromatin des Kernes erfährt eine mit der weiteren Ausbildung des Eies in Verbindung stehende Modifikation, auf welche weiter unten noch zurück zu kommen sein wird. Neuerdings hat man diese Vorgänge in enge Beziehung zur Bildung des Dotters gebracht, weshalb auf diesen zunächst eingegangen werden muß.

Der Dotter (N ä h r d o t t e r, D e u t o p l a s m a) ist ein Produkt der eigenen Tätigkeit der Eizelle und entsteht aus Nährsubstanzen, die auf verschiedenem Wege in das Ei gelangen, sei es, daß dieses in der Leibeshöhle der betreffenden Tiere oder in einem Hohlraum seiner Gonade von der ernährenden Flüssigkeit umspült und durchtränkt wird, sei es, daß bestimmte für die Ernährung des Eies vorhandene Zellen, Zellgruppen oder Zellschichten, die wir noch als Nährzellen und Follikel kennen lernen werden, die von ihnen vorbereiteten Nährstoffe an das Ei abliefern. In jungen Eizellen unterscheidet sich die Beschaffenheit des Ooplasmas kaum von derjenigen des Cytoplasmas anderer Zellen; allmählich treten aber feinkörnige, später gröbere Einlagerungen auf, welche aus den oben erwähnten Nährflüssigkeiten innerhalb des Eikörpers abgeschieden oder aber von den Hilfszellen direkt an das Ei abgegeben werden. In diesem werden die aufgenommenen Substanzen verarbeitet, d. h. durch Resorption, Assimilation und Wiederabscheidung in einen Zustand versetzt, in welchem sie für die Eizelle bei deren weiterer Veränderung verwertbar sind. Treten dabei wieder körnige Gebilde mehr vereinzelt oder in Ansammlungen von größerem oder geringerem Umfang auf (Fig. 13),

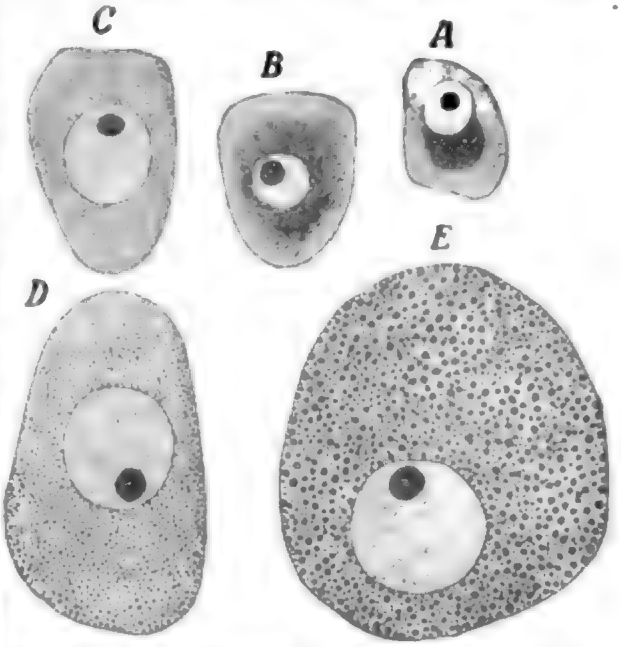


Fig. 13. Eierstockseier einer Ascidie (Molgula) in verschiedenen Altersstadien, die Vorstufen und allmähliche Ausbildung der Dottersubstanz zeigend. Nach Crampton.

so handelt es sich zunächst wieder nur um Vorstufen des eigentlichen Dotters, welcher aus dieser vitellogenen Substanz hervorgeht, indem er in Form von kleinen Tröpfchen oder Kügelchen im Ooplasma abgelagert wird (Fig. 13). Anfangs vereinzelt, allmählich immer zahlreicher treten die Dotterelemente in entsprechenden Lückenräumen (Vakuolen) des Ooplasmas auf, welches dadurch eine alveoläre Struktur erhält, insoweit diese nicht bereits vorhanden war, denn das Ooplasma mancher Eier zeigt an und für sich ein schaumiges Gefüge, wie es z. B. bei Medusen, Siphonophoren und Ctenopheren der Fall sein kann.

Das Auftreten des Dotters im Ei erfolgt insofern auf recht verschiedene Weise, als es zuerst mehr in der Mitte, d. h. in der Umgebung des Keimbläschens und unter dessen Einflußnahme, aber auch anscheinend unabhängig davon an der Eiperipherie vor sich gehen kann. Im letzteren Fall, der z. B. beim Salamanderei beobachtet wird, treten in der schon angegebenen Weise kleine Körnchen am Eirand auf, die vereinzelt in ziemlich unregelmäßiger Verteilung liegen, aber auch regelmäßiger in der Umgebung von Vakuolen verteilt sein können (Fig. 14 a). Die kleineren

Digitized by Google

Dotterelemente werden später zu größeren Dotterplättchen, sei es, daß eine Verschmelzung unter ihnen stattfindet, sei es, daß sie durch Hinzufügung neuer Masse aus der gelösten Substanz des Ooplasmas wachsen.

Daß auch die als Dotterkerne angesprochenen Eibestandteile sich an der Bildung des Dotters beteiligen können, wurde bereits mehrfach erwähnt. Der Dotterkern kann dabei einem körnigen Zerfall oder einer Auflösung in anderer Form unterliegen (Fig. 8 und 4); jedenfalls treten auch dabei feinkörnige Massen auf, welche sich an der Ausbildung des Dotters beteiligen. Aehnliches wurde oben für die Mitochondrien angegeben (Fig. 10 und 11). Immer wieder ist auch von einer Anteilnahme des Keimbläschens an der Dotterbildung die Rede gewesen, sei es, daß eine solche in Form einer bloßen Beeinflussung des Ooplasmas durch den Kern oder aber als Abgabe gelöster oder geformter Bestandteile stattfände. Daß gewisse Momente, wie die Aenderungen in der Größe und Struktur des Keimbläschens, sowie die Gestalt und Lageveränderungen für seine Anteilnahme an den im Eikörper sich vollziehenden Bildungsvorgängen sprechen, wurde bereits erwähnt (S. 5) und zwar würde dabei vor allen Dingen die Dotterbildung in Betracht kommen. Soweit es sich hierbei um den Austritt gelöster Stoffe aus dem Kern in das Ooplasma handelt, dürfte die Beteiligung an der Dotterbildung schwer zu verfolgen sein, doch hat man seit langem auch an die Abgabe geformter Substanzen seitens des Keimbläschens gedacht und derartige Vorgänge sind wiederholt beschrieben worden (Fig. 9), ohne daß sie sich einer besonderen Anerkennung zu erfreuen hatten. Ganz abgesehen davon, ob es sich bei manchen dieser Angaben um Täuschungen gehandelt haben könnte, gewannen sie neuerdings unter dem Einfluß der Chromidienlehre eine größere Bedeutung. Diese legt gerade auch bei der Eibildung auf die Abgabe chromatischer Bestandteile seitens des Kernes und ihre Verwendung beim Aufbau des Eikörpers ein großes Gewicht. Im einzelnen darauf einzugehen und die auf recht verschiedenartige Objekte bezüglichen Angaben zu erschöpfen, ist hier unmöglich, jedoch sollen wegen der diesen Vorgängen zukommenden allgemeineren Bedeutung einige von ihnen Berücksichtigung finden, woraus sich dann das wesentliche ergeben dürfte.

Man geht am besten von der jungen Oocyte bald nach der letzten Oogonienteilung aus, von welcher bereits weiter oben die Rede war. Die färbbare Substanz des Kernes kann

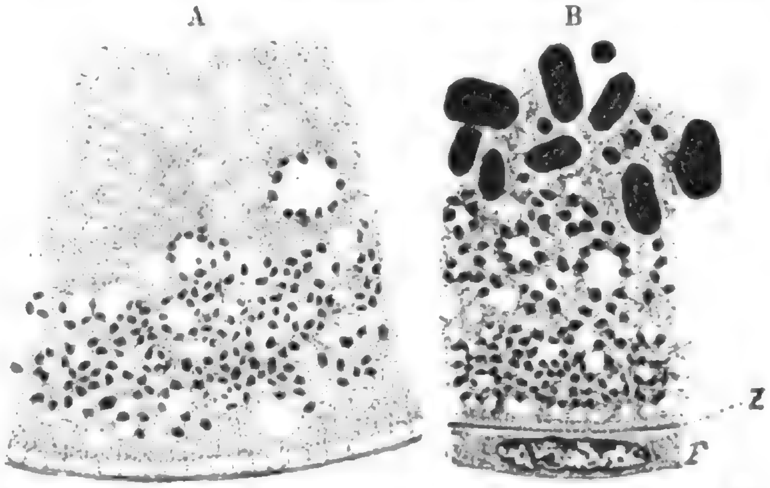


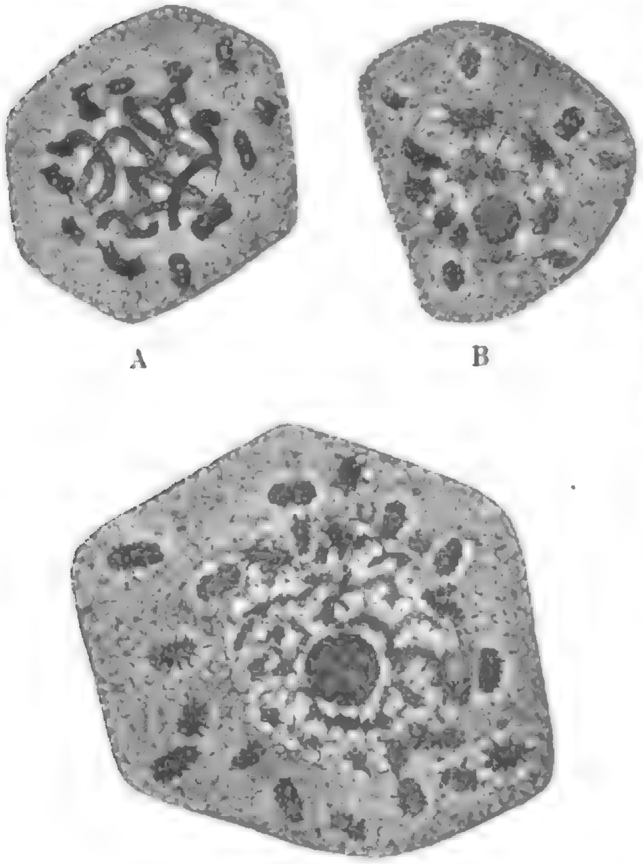
Fig. 14. Randzone von Eierstockseiern des Salamanders zur Erläuterung der Bildung der Dotterplättchen, A in früherem, B im späteren Stadium; z äußere homogene Randzone, F Follikelepithel.

sich in dem wegen der eigenartigen Anordnung als Buketstadium bezeichneten Zustand befinden (Fig. 12b A), doch erfährt diese bald eine Veränderung, indem sich kleinere Teile von den Schleifen abtrennen und diese dadurch zur Auflösung kommen (Fig. 12b B und C). Von der Abgabe der Schleifenenden aus dem Kern (Fig. 12b A bis C) war schon vorher in anderer Verbindung die Rede, jedoch findet eine Abgabe von Chromatin seitens des Kernes auch weiterhin noch statt. Um bei dem gewählten Beispiel des Amphibieneies zu bleiben, so beschreibt Jörgensen bei Proteus eine immer weiter fortschreitende Verteilung des Chromatins im Kern, welches in Form der Randnukleolen, zahlreicher feiner Körnchen usw. auftritt und schließlich eine Art von „Zerstäubung" erfährt. Feinste Chromatinkörnchen treten durch die Kernmembran in das umgebende Ooplasma aus. Den Austritt solcher Chromidien aus dem Kern beschreibt derselbe Autor für ein ganz anderes Objekt, das Ei eines Schwammes (Sycandra) und entsprechendes wird von Schaxel für Pelagia und allerdings in etwas anderer Weise für Ascidien, von Buchner für Sagitta und von Moroff für Copepoden, wie auch noch von einer Reihe anderer Autoren für verschiedene Objekte angegeben, die hier nicht alle genannt werden können.

Nur die Beobachtungen des zuletzt genannten Autors seien als besonders kennzeichnende noch hervorgehoben. Entgegen den Angaben anderer Autoren, daß eine Chromatinaus-

Digitized by Google

wanderung aus dem Kern nur in bestimmten Perioden erfolge, betont er, daß sie bei den von ihm untersuchten Copepoden während der ganzen Zeit des Eiwachstums vor sich geht und zwar würde danach die Chromatinabgabe seitens des Kernes eine ungemein starke sein. Nicht nur in Form kleinerer Partikel tritt die färbbare Substanz zur Chromidienbildung aus dem Kern hervor, sondern größere Partien, ganze Stücke des Kernfadens lösen sich von diesem ab, um durch die mehr oder weniger schwindende Kernbegrenzung in das umgebende Ooplasma



A B

C

Fig. 14a. Abgabe chromatischer Substanz (Chromidienbildung) in der jungen Oocyte von Centropages Kröyeri. Nach Moroff.

einzutreten (Fig. 14b A bis C). Infolge der massigen Produktion von Chromidien läßt Moroff diese ganz direkt an der Dotterbildung beteiligt sein, wie nach seiner Annahme das gesamte Eiwachstum nur eine Folge der Chromidienauswanderung ist. Damit kommt diese Auffassung am radikalsten zum Ausdruck, aber auch die übrigen genannten und manche andere Autoren schreiben unter deren Einfluß den von R. Hertwig aufgestellten, von Goldschmidt und anderen seiner Schüler energisch vertretenen Chromidienlehre den vom Kern produzierten Substanzen einen weitgehenden Einfluß auf die Ausbildung des Eies und damit auch auf die Dotterbildung zu.

Die Beschaffenheit des Dotters im ausgebildeten Ei ist eine recht verschiedene sowohl was das rein morphologische wie chemische Verhalten dieser Substanzen betrifft. In letzterer Hinsicht schloß man aus dem Verhalten des Dotters gegen gewisse Farbstoffe und Reagentien, daß man es mit ähnlichen Körpern wie beim Chromatin des Kernes zu tun habe und machte dafür den nukleären Ursprung verantwortlich. In Wirklichkeit sind jedoch im Dotter keine Nukleine, sondern die in ihrer chemischen Struktur abweichenden Paranukleinstoffe vorhanden (A. Kossel). Die in den Kernen der sich entwickelnden Eier enthaltenen Nukleine sind nicht im Dotter vorgebildet, sondern entstehen während der Entwickelung in den Kernen durch deren eigene Tätigkeit, wie sich denn auch aus Kossels Untersuchungen ergab, daß der Gehalt an Nukleinen in dem sich entwickelnden Ei stetig zunimmt.

Im allgemeinen besteht der Dotter aus Eiweißkörpern, die zum Teil gelöst, in flüssiger oder halbflüssiger Form, jedoch auch in fester Beschaffenheit vorhanden sind; außerdem aber finden sich fettartige Substanzen, Oeltropfen und dergleichen im Dotter verteilt oder sogar in Gestalt umfangreicher kugelförmiger Gebilde. Die Beschaffenheit des Dotters chemisch zu fixieren, ist aber schon deshalb schwierig, weil er nicht nur in den Eiern verschiedener Tiere eine sehr differente Zusammensetzung zeigt, sondern auch während der Eibildung und dann im Lauf der Embryonalentwickelung gewissen Veränderungen unterworfen ist. Was das morphologische Verhalten betrifft, so mußte auf die als Vitellogene oder Protolecithe bezeichneten Substanzen vorher bereits hingewiesen werden; hier sei bezüglich der Beschaffenheit des Dotters im ausgebildeten Zustand des Eies noch hinzugefügt, daß er bei manchen Tieren ziemlich homogen oder gleichmäßig aus kleinen Körnchen zusammengesetzt erscheint. Bei anderen dagegen zeigt er untermischt kleinere und größeren kugelige Elemente oder besteht aus Plättchen von verschiedener Größe wie dies besonders bei den Haifischen und Amphibien der Fall ist (Fig. 15). Dabei kann offenbar eine Vereinigung der kleineren zu größeren Dotterkörpern und andererseits auch wieder ein Zerfall der gröberen in feinere Elemente stattfinden. Die Dotterplättchen können zu regelmäßig geformten Täfelchen werden und kristalloide Formen annehmen, wie auch direkt Kristalle im Dotter auftreten können (wohl Eiweißkristalle, wie sie gelegentlich in Eiern von Gliedertieren und Wirbeltieren gefunden

Digitized by Google

werden). Bei manchen Tieren, wie z. B. gewissen Insekten, kann der Dotter aus regelmäßig gestalteten Schollen bestehen, während er wieder bei anderen Insekten eine feine oder grobkörnige Masse darstellt.

Fig. 15. Dotterplättchen eines Rochens (Torpedo ocellata) in verschiedener Größe, nach Zerfall der größeren Plättchen. Nach J. Rückert aus Waldeyer: Die Geschlechtszellen.

Bestimmte Regeln für die einzelnen Abteilungen des Tierreichs werden sich darin kaum aufstellen lassen, nur zeigen allerdings einzelne gewisse, für sie recht charakteristische Besonderheiten. Dazu gehört z. B. die Differenzierung des Dotters in verschiedene Schichten und Regionen, wie sie unter anderen von den ungemein dotterreichen Eiern der Selachier, Reptilien und Vögel bekannt ist. Am Vogelei unterscheidet man hauptsächlich einen gelben und weißen Dotter. Der erstere macht bei weitem die Hauptmasse des Dotters aus und setzt sich seinerseits wieder aus konzentrischen Schichten zusammen (Fig. 17). Er besteht aus gelblich gefärbten, sehr zartwandigen und leicht zerstörbaren Bläschen, welche einen feinkörnigen Inhalt aufweisen. Der weiße Dotter (Fig. 16) ist aus kleineren farblosen Kügelchen zusammengesetzt, die einige stark lichtbrechende Tröpfchen enthalten, Bildungen, welche man früher als zelliger Natur ansah und im Anklang daran als Dottercytoide bezeichnet (Fig. 16). Der weiße Dotter des Vogeleies bildet noch eine stärkere Anhäufung

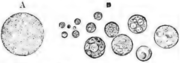


Fig. 16. Dotterkörner des Hühnereies in verschiedener Größe, A aus dem gelben, B aus dem weißen Dotter. Nach Balfour.

unter der Keimscheibe (Cicatricula, Narbe, Hahnentritt der alten Embryologen, Fig. 17) und erstreckt sich in dünner Lage um den gelben Dotter (Eidotter, Eigelb), wobei man sich das Verhalten dieser Schichten übrigens nicht so vorzustellen hat, daß sie scharf getrennt seien, sondern sie gehen vielmehr an den Grenzen ineinander über.

Die Verschiedenheit in der Zusammensetzung des Dotters gibt sich bei vielen Eiern schon durch die Färbung zu erkennen; selten ist der Dotter farblos, so daß die dotterhaltigen Eier die Durchsichtigkeit dotterarmer Eier bewahren. Oefter ist der Dotter opak und von gelblicher Färbung,

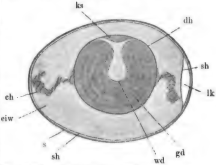


Fig. 17. Längsschnitt durch das Hühnerei, etwas schematisiert. ch Chalazen, dh Dotterhaut, eiw Eiweiß, gd gelber Dotter, ks Keimscheibe, lk Luftkammer, s Schale, sh Schalenhaut, wd weißer Dotter.

wie wir es besonders vom Vogelei kennen, wo man direkt vom Eigelb als vom Dotter spricht. Es kommen aber andere Dotterfärbungen vor, rot, violett, blau, grün usw.; derartig gefärbte Eier sind dann meistens sehr undurchsichtig und für das Studium entwickelungsgeschichtlicher Vorgänge wenig geeignet. Uebrigens braucht die Farbe der Eier nicht an den Dotter gebunden zu sein, sondern kann dem sonstigen Ooplasma angehören und in Form zarter Pigmentkörnchen darin verteilt sein. Bekannt dafür sind besonders die Froscheier mit ihrer starken, braunen bis schwarzen, Pigmentierung der animalen Hälfte. Eine sehr charakteristische Pigmentierung findet sich bei einem Seeigel (Strongylocentrotus lividus), indem ein unter der Eioberfläche gelegenes gelbrotes Pigment einen breiten, mehr dem vegetativen Pol genäherten Ring um das Ei bildet. Derartige Differenzierungen haben sich für das Studium der Entwickelung zumal als Marken für den Ablauf des Furchungsvorgangs als sehr wichtig erwiesen und bilden auch eine wertvolle Hilfe bei experimentellen Beobachtungen.

Dem Dotter, seiner Verteilung im Ei und der Struktur des Eikörpers überhaupt mußte eine eingehendere Betrachtung gewidmet

Digitized by Google

werden, da diese Dinge als bedeutungsvolle Faktoren für den Ablauf der Entwickelung erkannt wurden und die Eistruktur von bestimmendem Einfluß auf die Art der Ausbildung gewisser Regionen sein oder doch im engen Zusammenhang damit stehen kann. Bei vielen Tieren lassen sich zwischen bestimmten Regionen des Embryos und des Eies Beziehungen feststellen, so daß diese Regionen im Ei bereits festgelegt erscheinen und aus der Form und Struktur des Eies, sowie der Dotter- und Pigmentverteilung in ihm erkannt werden können (prospektive Eistruktur). Experimentelle Untersuchungen an Coelenteraten, Echinodermen, Ascidien, Amphibien und anderen Tieren haben dies mit Sicherheit erwiesen (vgl. den Artikel „Entwickelungsmechanik und Entwickelungsphysiologie der Tiere"). In dieser und anderer Beziehung, vor allem hinsichtlich der Entwickelung der Organe ist die Verteilung des Dotters im Ei sehr bedeutungsvoll, weshalb ihr noch eine kurze Betrachtung zu widmen ist, soweit nicht vorher bereits die Rede davon war.

Die Verteilung des Dotters bringt es mit sich, daß sich gewisse Regionen im Ei unterscheiden lassen. Bei den mit einem sehr geringen Dottergehalt versehenen, sogenannten alecithalen Eiern ist dies zwar weniger der Fall, wohl aber bei denjenigen Eiern, deren Dottergehalt mehr zunimmt. Dies pflegt bei sehr vielen tierischen Eiern so zu geschehen, daß die Dotteranhäufung an einem Pole eine stärkere wird als an dem entgegengesetzten Pole (Fig. 18); man spricht dann von telolecithalen Eiern und bezeichnet den dotterreichen als den vegetativen Pol, weil später in der Embryonalentwickelung an diesem Teil des Eies zumeist die Anlage eines ausgesprochen „vegetativen" Organs, nämlich des Darmkanals erfolgt, während an dem entgegengesetzten Pol diejenige des Nervensystems, also eines „animalen" Organsystems vor sich zu gehen pflegt, so daß man diesen Pol den animalen Pol des Eies nennt. Er ist übrigens für gewöhnlich noch dadurch gekennzeichnet, daß an ihm als der an Protoplasma reicheren, also bildungsfähigeren Region des Eies die sogenannten Reifungsteilungen erfolgen und dementsprechend hier die „Richtungskörper" gefunden werden (vgl. weiter unten Abschnitt II). „Telolecithale" Eier sind ebenso wie die „alecithalen" im Tierreich sehr verbreitet und finden sich von den Schwämmen bis hinauf zu den Säugetieren.

Die Dotteranhäufung am vegetativen Pol kann stärker und stärker werden, so daß die Bildungsmasse, das Protoplasma immer mehr nach dem animalen Pol hin verdrängt wird und schließlich hier nur noch eine ganz dünne scheibenförmige Lage bildet (Fig. 19). Dies ist dann der einzige noch bildungsfähige Teil am Ei gegenüber der so ungemein umfangreich gewordenen Nährsubstanz, welche den gesamten übrigen Ei-Inhalt ausmacht; da an ihr zunächst ausschließlich die Eifurchung und Anlage des Embryos erfolgt (vgl. den Artikel „Ontogenie"), so nennt man sie die Keimscheibe der so extrem ausgebildeten telolecithalen Eier (Fig. 19). Man findet diese sehr umfangreich werdenden Eier vor allem bei den Wirbeltieren, nämlich bei den Fischen, Reptilien und Vögeln, ausnahmsweise auch bei

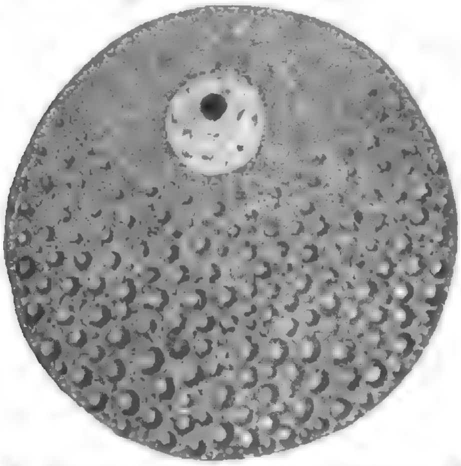


Fig. 18. Gastropodenei mit Keimbläschen, Keimfleck und Dotter.

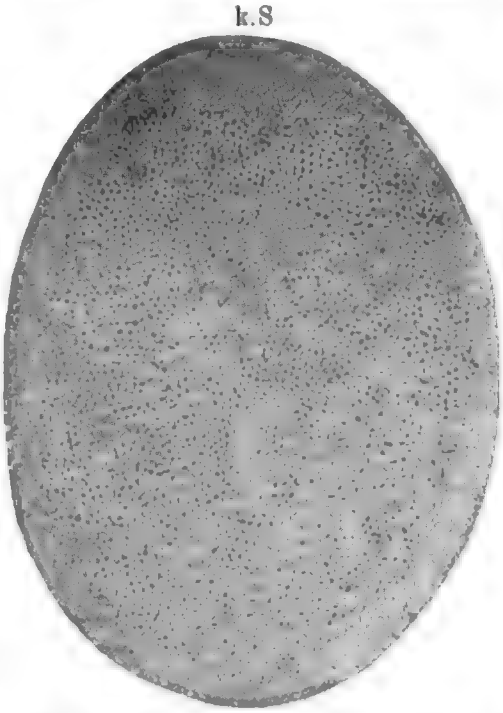


Fig. 19. Cephalopodenei im Längsschnitt, oben die Keimscheibe (ks) mit dem Keimbläschen, das übrige Dotter.

den Amphibien (Cöcilien) während die Säugetiere kleine, verhältnismäßig dotterarme Eier besitzen, die sich total und nicht nur partiell furchen, wie es bei den anderen dotterreichen Eiern der Fall ist. Diese durch eine discoidale, sich nur an der Keimscheibe vollziehende Furchung ausgezeichneten Eier der meisten Wirbeltiere nennt man deshalb „meroblastische“ Eier im Gegensatz zu den sich vollständig (total) furchenden „holoblastischen Eiern“, wie sie außer den Säugetieren unter den Vertebraten noch den Amphibien wie den meisten anderen Tieren zukommen. Ausnahmsweise finden sich meroblastische Eier mit Keimscheibe auch noch bei einer Anzahl anderer Tierformen, so unter den Weichtieren bei den Cephalopoden, unter den Gliedertieren beim Skorpion und einigen Krebsen (Oniscus, Mysis, Cuma), unter den Manteltieren (Tunicaten) bei den Feuerwalzen (Pyrosomen). Das Vorkommen dieser eigenartig strukturierten Eier mit einem dadurch bedingten besonderen Furchungsverlauf bei so ganz verschiedenen Tierformen zeigt mit Sicherheit an, daß diese Eiform dem vorhandenen Bedürfnis folgend zu verschiedenen Malen und bei der einen Tierform unabhängig von der anderen entstand, daß ihr also irgendwelcher systematischer Wert nicht beizulegen ist.

Ganz abweichend von der zuletzt geschilderten Verteilung des Dotters bei den telolecithalen Eiern ist diejenige, welche man bei den sogenannten „centrolecithalen Eiern“ findet. Bei ihnen sammelt sich der Dotter und zwar ebenfalls sehr massenhaft im Ei-Innern an, um nur eine recht dünne Außenlage protoplasmatischer Substanz frei zu lassen (Fig. 20), das „Keimhautblastem“ genannt, weil sich in diesem Bezirk, aber freilich in anderer Weise wie an der Keimscheibe der telolecithalen Eier, die Ausbildung des Keims vollzieht. Jedenfalls ist aber auch hier diese „Bildungsschicht“ gegenüber der zentralen Dottermasse der „centrolecithalen“ Eier ausgezeichnet; allerdings vollziehen sich die ersten Entwickelungsvorgänge (Teilung der Furchungszellen) zunächst nicht in der peripheren Lage, sondern im Ei-Innern (vgl. den Artikel „Ontogenie“). Die Furchungskerne begeben sich dann größtenteils oder sogar alle in die protoplasmatische Rindenschicht, um hier das Blastoderm, die Keimhaut, zu bilden, wodurch die Furchung zu einer „superficiellen“ wird. An dem Blastoderm verlaufen zunächst die weiteren Entwickelungsvorgänge ziemlich unabhängig vom Dotter und da dies bis zu einem gewissen Grade auch die Furchung betrifft, so spricht man bei diesen Eiern ebenfalls von einer partiellen Furchung, was freilich im Hinblick auf die vorher im Eiinnern sich abspielenden Teilungsvorgänge nicht ganz richtig ist. Derartig gebaute und auf diese Weise sich entwickelnde Eier besitzen hauptsächlich die Giedertiere, obwohl manche von ihnen (gewisse Krebse, Spinnen, Tausendfüße u. a.) eine totale oder dieser doch nahestehende Form der Furchung aufweisen, während wieder andere, wie schon oben erwähnt,

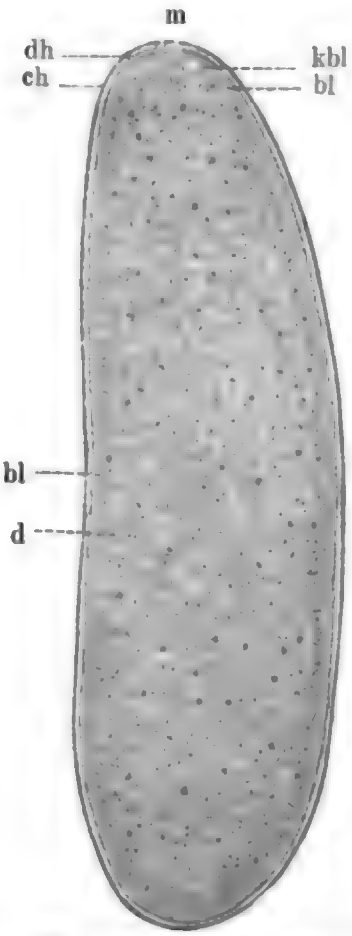


Fig. 20. Dipterenei im Längsdurchschnitt. bl Keimhautblastem, ch Chorion, d Dotter, dh Dotterhaut, kbl Keimbläschen, m Mikropyle.

eine Keimscheibe und discoidale Furchung zeigen. Sonst sind centrolecithale Eier nur selten und finden sich unter den Stachelhäutern gelegentlich bei einer Cucumaria (Seewalze), sowie unter den Coelenteraten bei Renilla und Clavularia.

2e) Zur Keimzellendetermination in Beziehung stehende Differenzierungen im Ooplasma. Abgesehen von den bereits besprochenen Differenzierungen finden sich in den Oocyten mancher Tiere noch andere, die mit dem Verlauf der Entwickelung in direkter Beziehung stehen, wobei besonders an diejenigen Eigentümlichkeiten gedacht wird, welche mit der späteren Ausbildung der Keimzellen zu tun haben. Bei einer Anzahl von Tieren kommt es in der Ontogenie zu einer ungemein frühen Sonderung der Geschlechtsanlage, die schon vor der Ausbildung der Keimblätter, während der

Digitized by Google

Eifurchung oder bereits zur Zeit der ersten Teilungen des befruchteten Eies kenntlich hervortreten kann (vgl. die Artikel „Ontogenie" und „Geschlechtsbestimmung"). Dem Plasma der Keimzellen können nun gewisse Bildungen von der Eizelle überwiesen werden, welche sich in ihrem Ooplasma schon mehr oder weniger deutlich nachweisen ließen. Ein bekanntes Beispiel dafür bietet das Dipterenei, an dem die Urgeschlechtszellen (als sogenannte Polzellen) schon in einem frühen Furchungsstadium zur Sonderung gelangen und durch Aufnahme körniger, stark färbbarer Substanzen, die als plattenförmige Anhäufungen an dem betreffenden Eipol lagerten, gekennzeichnet werden. Durch die neueren Beobachtungen an Musca, Chironomus und Cecidomya ist dies mit Sicherheit erwiesen (Noack, Hasper, Kahle). Aehnliche Einlagerungen in das Ooplasma von ganz entsprechender Bestimmung finden sich in den Eiern von Käfern und Hautflüglern (Hegner, Silvestri).

Offenbar ist das Vorkommen derartiger „Keimzelldeterminanten" in den Oocyten weiter verbreitet, als bisher angenommen wurde, so hatte Haecker auf die den Weg der Keimbahn bezeichnenden Gebilde im Copepodenei (Cyclops) hingewiesen. Vielfach sind es chromatische Substanzen, die durch Umwandlung von Chromosomen oder Abgabe von Nucleolen seitens des Kernes entstanden und nach gewissen Modifikationen im Ooplasma verblieben. Eine Kennzeichnung der Oocyte gegenüber den trophischen (Nähr-) Zellen durch derartige chromatische Substanzen wird bei Besprechung der Eibildung noch zu erwähnen sein. Uebrigens ist diese Erscheinung nicht nur auf die Eier von Gliedertieren beschränkt, sondern findet sich auch bei anderen Tieren; neuerdings ist darauf besonders bei den Eiern der Pfeilwürmer (Sagitta) geachtet worden (Elpatiewsky, Buchner). Zumal der letztgenannte Autor hat diese zum Teil von den Oocyten selbst gelieferten, zum Teil anscheinend von außen (etwa als modifizierte Hilfszellen oder deren Kerne) in sie gelangten Gebilde eingehender studiert und gibt eine vergleichende Darstellung der bei den verschiedenen Tieren darüber gemachten Beobachtungen (Buchner 1910). Hier kann auf die nicht eigentlich in den Rahmen dieser Betrachtung gehörenden, aber nach verschiedener Richtung bedeutungsvollen Dinge nicht weiter eingegangen, sondern nur auf die genannten Publikationen verwiesen werden.

3. Die Eihüllen (Eihäute). Fast immer ist das Ei von einer oder mehreren schützenden Hüllen umgeben. Liegt es wie bei den Schwämmen im Parenchym des Körpers, wo es seine Entwickelung durchmacht, so bedarf es der Hüllen kaum und diese fehlen. Aehnliches kann auch bei manchen Coelenteraten (Hydromedusen, Siphonophoren, Anthozoen) der Fall sein, während andere Coelenteraten Eihüllen besitzen. Dauernd oder doch eine Zeitlang hüllenlose Eier kommen auch noch bei höher stehenden Tieren wie Stachelhäutern und Muscheln vor, von denen die Eier nackt ins Wasser abgegeben werden. Wenn die Eier unter solchen oder anderen Verhältnissen keinen besonderen Fährlichkeiten ausgesetzt sind, bleiben die Hüllen dünn und zart, werden dagegen fester und widerstandsfähiger, wenn die Eiablage unter ungünstigeren Umständen erfolgt und die Eier den Unbilden der Witterung ausgesetzt sind. Dann werden so feste und voluminöse Hüllen gebildet, wie wir sie von den Insekten, Vögeln und manchen anderen Tieren kennen.

Die Eihüllen sind sowohl ihrer Form und Struktur, wie ihrer Entstehung nach sehr verschiedenartig. Je nachdem sie vom Ei selbst, von Zellen des Eierstocks oder durch Abscheidungsprodukte des Eileiters gebildet werden, hat man sie als primäre (Dotterhaut), sekundäre (Chorion) und tertiäre Eihüllen (Schleim-Gallert-Eiweißumhüllungen, Kokons u. dgl.) bezeichnet, die entweder einzeln für sich, zu zweien oder alle drei als Schutzhüllen vorhanden sein können. Seltener kommt es vor, daß die als Eihülle funktionierende Membran von zelligen, entsprechend umgewandelten Lagen des Embryos geliefert wird und dann als „Embryonalhülle" zu bezeichnen ist, wie dies für die Zona radiata der Bandwurmeier, die feste spindelförmige Hülle der Echinorhynchen oder die sogar mit Zacken und höheren stabförmigen oder verzweigten Erhebungen versehene Eischale der Süßwasserpolypen gilt.

Die primäre Eihülle (Dotterhaut, Dottermembran) kann als dünne, strukturlose Membran vom Ei ausgeschieden werden, kann aber auch bereits größere Stärke und Festigkeit erlangen, so daß sie einen wirksamen Schutz für das Ei abgibt. Zuweilen ist sie von feinsten radiär verlaufenden Porenkanälen durchsetzt, wie dies (Fig. 21) für die sogenannte Zona radiata der Echinodermen, Würmer, Weichtiere und Wirbeltiere gilt (Zona pellucida). Durch wiederholte Abscheidung von seiten des Eies oder vielleicht infolge von Spaltung der schon vorhandenen Membran kann eine zweifache Hülle gebildet werden. Manche andere Komplikationen kommen noch hinzu, um die Hülle zu verstärken. Auffallend ist, daß sie bei manchen Tieren bereits sehr früh auftritt, wenn das Ei noch ganz klein ist und dann mit ihm wächst, während sie bei anderen Tieren erst sehr spät gebildet wird,

Digitized by Google

so bei Echinodermen erst zur Zeit des Befruchtungsaktes, indem sich die Dottermembran nach dem Eindringen des Spermatozoons abhebt, um eine „Ueberfruchtung" des Eies durch den weiteren Zutritt von Samenfäden zu verhindern. Letzterer erfolgt übrigens bei solchen Eiern,

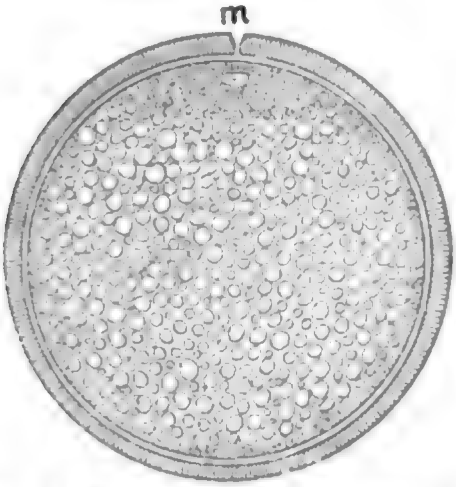


Fig. 21. Knochenfischei mit Keimscheibe, Keimbläschen, Zona radiata und Mikropyle (m).

die schon früh von einer festen, für die Samenfäden undurchdringlichen Hülle umgeben sind, durch einen vorgebildeten Porenkanal, die Mikropyle (Fig. 21), deren Umgebung zuweilen durch besondere, den Eintritt der Spermatozoen befördernde Einrichtungen ausgezeichnet ist.

Die sekundäre Eihülle (Chorion) hat eine geringere Verbreitung als die Dotterhaut und kann außer dieser vorhanden sein, also die Dotterhaut umgeben, wie es z. B. bei den Insekteneiern der Fall ist. Von den Zellen des Follikelepithels als cuticuläre Bildung abgeschieden (vgl. Abschnitt III), kann es die Form einer glatten ziemlich strukturlosen Membran zeigen, aber auch mehrfach geschichtet, von Poren durchsetzt und an der Oberfläche mit einer Felderung, Leisten, Zapfen oder sonstigen Erhebungen versehen sein (Fig. 22 und 23), wodurch eine

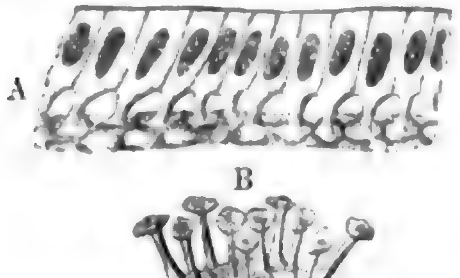


Fig. 22. A Follikelepithel mit Chorion eines Heuschreckeneies (Decticus). B Stück des Chorions von Locusta viridissima.

komplizierte und oft sehr zierliche Struktur der Außenfläche zustande kommt. Dies gilt besonders für die mit einem sehr festen Chorion versehenen kugligen, ovalen oder

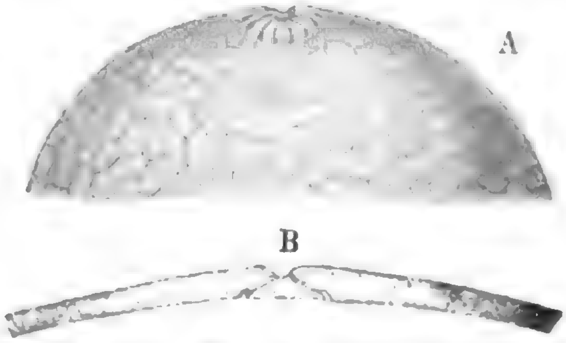


Fig. 23. Oberer Eipol eines Schwärmereies mit Felderung des Chorions und Mikropylenapparat. A im Aufsichtsbild, B Durchschnitt bei stärkerer Vergrößerung.

länglichen Insekteneier, kommt aber in ähnlicher Weise auch bei anderen Tieren vor, so sind die Eier mancher Seerosen mit Stacheln versehen und eine solche Bedeckung mit Höckern und stachelartigen Erhebungen findet sich auch an den Eiern der Fische, Chitonen und Bärtierchen (Fig. 24 und 25),

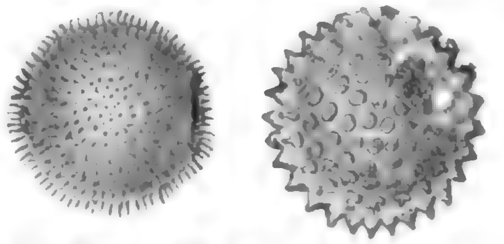


Fig. 24. Eier von Bärtierchen. A Macrobiotus Oberhäuseri, B von M. Schultzei. Nach Greeff.

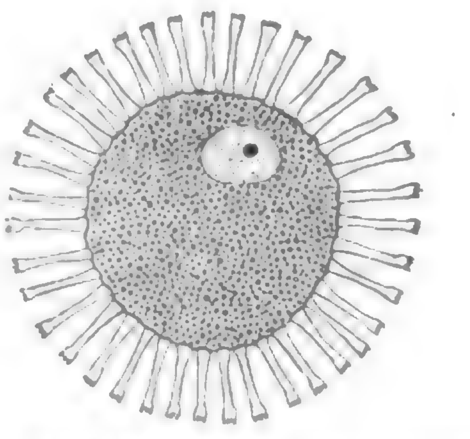


Fig. 25. Ei einer Käferschnecke (Acanthopleura echinata) mit Keimbläschen, Chorion und Stachelbesatz.

also bei ganz verschiedenen Tierformen. Es handelt sich dabei um Einrichtungen, die mit der Art der Eiablage im Zusammenhang

Digitized by Google

stehen und zum Schutz der Eier dienen oder ihnen sonstige Vorteile gewähren. In dieser Beziehung kann es zu recht eigenartigen Bildungen kommen, wie z. B. bei der indischen Heuschrecke Cleandrus graniger, deren einer kielartig zulaufender Eipol von zwei Falten umgeben ist (Fig. 26A). Beim Wasser-

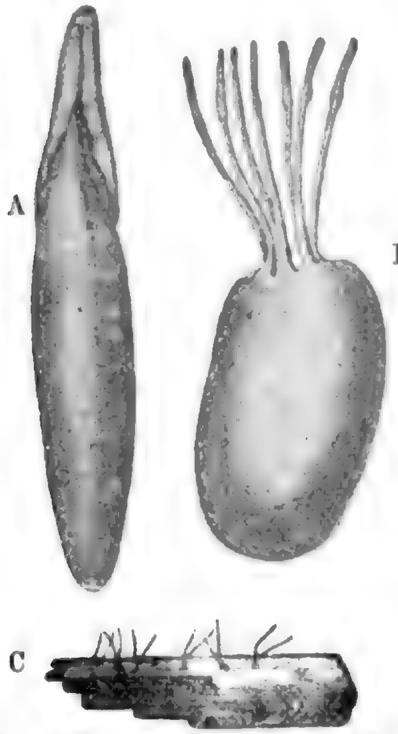


Fig. 26. A Ei einer Heuschrecke (Cleandrus graniger), B vom Wasserskorpion (Nepa cineria) mit den 7 stabförmigen Fortsätzen, C Eier von Ranatra (mit 2 Fortsätzen) in einen angefaulten Pflanzenstengel versenkt.

skorpion (Nepa cineria) steht an dem einen Eipol eine Anzahl stabartiger Fortsätze (Fig. 26 B), die an der Spitze und im Innern porös und dadurch geeignet sind, einer ebenfalls porösen Schicht des Chorions Luft zuzuführen. Diese Einrichtung ist daraus zu erklären, daß die Eier dieser Insekten in Pflanzenstengel versenkt werden und die Spitzen der Fortsätze dann daraus hervorragen, um die Verbindung mit der Luft herzustellen (Fig. 26C). Derartige und andere mit den biologischen Bedingungen der abgelegten Eier im Zusammenhang stehende Einrichtungen ließen sich noch eine Menge vorbringen (vgl. Leuckart, Mikropyle und Schalenhaut der Insekteneier). Sehr vielgestaltig sind auch die Vorrichtungen zum Eintritt der Samenfäden, die sich wie an der Dotterhaut so auch am Chorion finden und aus einem oder mehreren, gewöhnlich am animalen Pol, d. h. also in der Nähe des Bildungsplasmas gelegenen Mikropylenkanälen bestehen (Fig. 23).

Die tertiären Eihüllen können außer Dotterhaut und Chorion vorhanden und dann über letzterem abgelagert sein, so daß die Eier in diesem Fall von dreierlei schützenden Hüllen umgeben sind. Unter der tertiären Hülle kann aber die sekundäre fehlen. Die tertiären Hüllen sind recht verschiedenartiger Natur; im einfachsten Fall handelt es sich um eine Abscheidung von schleimigen und gallertartigen Substanzen um die Eier, die dann einzeln oder in größeren Massen davon umgeben sind (Amphibien, Schnecken, Tintenfische u. a.). Auf diese Weise kommen die Laichmassen zustande, wie sie von den genannten Tieren, sowie von Würmern und Insekten bekannt und in Form von Platten und Schnüren oder unregelmäßigen Klumpen abgelegt werden. Produziert werden diese Hüllsubstanzen, wie schon erwähnt, von Drüsen des Leitungsapparates.

Das große dotterreiche Vogelei (Eigelb) verläßt, von einer zarten Dotterhaut umgeben, den Eistock, um in die Bauchhöhle der Mutter und von da durch das Ostium tubae in den Eileiter zu gelangen; die drüsige Wandung des letzteren scheidet dann das Eiweiß aus, welches in mehreren Schichten den Dotter umgibt; davon ist die innerste Schicht ganz besonders dicht und setzt sich an zwei gegenüberliegenden Polen der Dotterkugel in je einen spiralig gewundenen Strang fort (Fig. 17). Diese sogenannten Hagelschnüre (Chalazen) erstrecken sich durch das übrige Eiweiß an die beiden Schalenpole, denn die Eiweißmasse ist von einer straffen Membran, der Schalenhaut, umgeben; diese besteht aus zwei Lagen, welche am stumpfen Eipol auseinander weichen und hier die für die Embryonalentwickelung wichtige Luftkammer bilden (Fig. 17). Ueber der Schalenhaut liegt erst die feste Kalkschale, welche bis zu 98% aus Kalksalzen besteht und infolge ihrer Porosität luftdurchlässig ist, ebenfalls eine für die Embryonalentwickelung bedeutungsvolle Einrichtung. Mit der zunehmenden Größe erlangt das Vogelei eine immer festere Kalkschale, wie dies vom Straußenei zur Genüge bekannt ist. Form und Farbe der Vogeleier sind sehr mannigfaltig und haben bei Fachleuten und Liebhabern sehr zum Sammeln angeregt, woraus sich ein besonderer Zweig der Ornith-Anithologie die sog. Eierkunde (Oologie) entwickelt hat.

Aehnlich kompliziert gebaut sind die Eier der Reptilien und ebenfalls durch feste Hüllen gut geschützt diejenigen der Selachier, bei denen das sehr dotterreiche Ei im Eileiter mit einer Eiweißschicht und einer festen hornigen Kapsel umgeben wird, welche bei den einzelnen Hai- und Rochenarten recht variable Formen zeigt und an den Ecken in Schnüre ausgehen kann, die zur Befestigung

Digitized by Google

der umfangreichen Eikapseln an Pflanzenstengeln dienen (Fig. 27).

Fig. 27. Eikapsel von Scyllium mit den Befestigungsfäden. Nach Meisenheimer.

Bei den zuletzt beschriebenen Eiern finden sich zuweilen mehrere „Eidotter" in einer Kapsel, welches Verhalten zu den Kokons hinüber leitet, für die es gerade kennzeichnend ist, daß in einer Eikapsel mehrere Eier enthalten sind. Auch bei ihnen wird die Kapsel von Abscheidungsprodukten des Leitungsapparates gebildet und solche liefern auch den gewöhnlich vorhandenen ernährenden Inhalt des Kokons, wenn nicht zellige Elemente (sogenannte Nähr- oder Dotterzellen) zum gleichen Zweck darin niedergelegt werden. Letzteres gilt z. B. für die Eikapseln der Strudel- und Saugwürmer (Turbellarien und Trematoden), von denen die letzteren allerdings zumeist nur eine Eizelle außer dem Nährzellinhalt beherbergen, so daß man von ihnen als von „Eiern" zu sprechen pflegt (Fig. 28 A bis C).

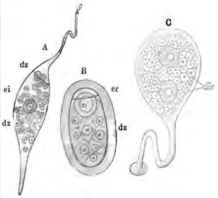


Fig. 28. Eikapseln A von Microcotyle mormyri, B von Distomum tereticolle, C von Prostoma Steenstrupi, dz Dotterzellen, ei und Ez Eizellen. Nach Lorenz, Schauinsland und Hallez.

Kokons, die allerdings nicht immer vom Leitungsapparat, sondern auch von Sekreten der Hautdrüsen geliefert werden, kommen bei den Regenwürmern und Blutegeln vor (Fig. 29 und 30). Im ersteren Fall handelt es sich

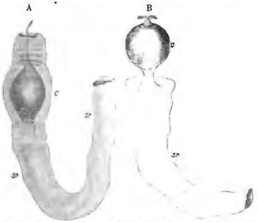


Fig. 29. Regenwurm-Kokons (c) (Allolobophora foetida). A in der Schleimröhre (sr), B diese etwas zurückgezogen. Nach K. Foot.

Digitized by Google

um gelbgefärbte, zitronenförmige Gebilde, die etwa erbsengroß werden und in der eiweißhaltigen Flüssigkeit, welche sie erfüllt, mehrere

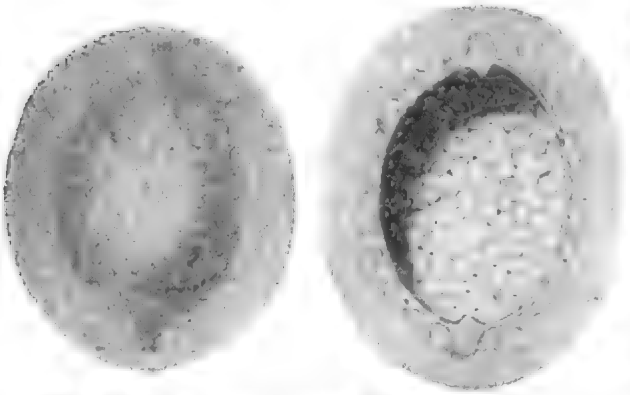


Fig. 30. Blutegel-Kokons (Hirudo medicinalis) in Oberflächenansicht (A) und durchschnitten (B). Nach Meisenheimer.

Eier führen; sie werden außerdem bei der Ablage noch mit einer schützenden Schleimhülle umgeben (Fig. 29). Die bis zu 2 cm Länge erreichenden Kokons der Blutegel sind von einer schwammigen Masse überdeckt, welche ihrer Wand eine besondere Dicke verleiht (Fig. 30). Aehnliche Kokons, die jedoch innerhalb des Geschlechtsapparates gebildet werden, finden sich auch bei den Insekten. Bei Mantis sind es aus einer spongiosen Masse bestehende Kapseln, die mit breiter Basis an Pflanzenstengeln oder Steinen sitzen. Bei den Schaben (Periplaneta und Phyllodromia) sind es feste chitinöse Gebilde von kofferartiger Form, die in Fächern aufgereiht die Eier enthalten und vom Weibchen am Hinterleib herumgetragen werden. Bei dem Wasserkäfer (Hydrophilus) stellt der Kokon ein regelmäßig geformtes, ovales Gespinst dar, welches pallisadenartig angeordnet 45 bis 50 Eier enthält, an der Unterseite schwimmender Blätter am Wasserspiegel angelegt wird, und von dem mastartig ein ebenfalls gesponnener dünner Stiel nach oben ragt. Aus Fäden gesponnene Kokons umhüllen auch die Eier der Spinnen, welche ebenfalls gelegentlich vom Tier herumgetragen werden.

Kokons von recht verschiedenartiger Form und Struktur kommen bei den Schnecken vor, bei welchen sie rund, oval, becherförmig gestaltet, mit Stielen versehen und gedeckelt sein können; die häutige Kapsel kann durch Inkrustation mit Kalksalzen die Konsistenz einer Kalkschale annehmen. Wenn die Kapsel bei einigen Landschnecken noch sehr umfangreich wird und wie bei der ceylonesischen Helix Waltoni die Größe eines Sperlingseies oder bei einigen südamerikanischen Bulimus-Arten diejenige eines Taubeneies erreicht, so ist die Aehnlichkeit mit einem Vogelei eine recht große und kann zu einer Verwechselung damit führen. Insofern solche Kokons nur einen Embryo zu enthalten pflegen, sind sie von einem echten „Ei" nur schwer zu unterscheiden. Eine Täuschung kann darin freilich insofern bestehen, als in dem Kokon zuerst mehrere Eier und Embryonen vorhanden waren, von diesen sich jedoch einige oder auch nur einer auf Kosten der anderen entwickelte und schließlich allein zur völligen Ausbildung gelangte, während die anderen zugrunde gingen und direkt oder indirekt zu seiner Ernährung verbraucht wurden.

Bei einer anderen Schnecke (Janthina) werden die becherförmigen Eikapseln an einen voluminösen spindelförmigen, aus entsprechender Substanz bestehenden Körper befestigt, welcher luftführende Räume enthält und mit welchen die Schnecke, da er am zugespitzten Ende ihres Fußes befestigt ist, wie mit einem Floß herumschwimmt. Derartige wie einige der anderen angeführten Fälle gehören bereits in das Kapitel der Brutpflege, auf welchen Artikel hiermit verwiesen sei (Artikel „Brutpflege").

II. Eizelle und Eireifung.

Nachdem wir die Morphologie des Eies kennen lernten, ist die Basis gewonnen für die Erörterung des Begriffs „Ei" und „Eizelle", welche im Rahmen dieses Artikels nicht zu entbehren ist, wenn sie auch aus bestimmten Gründen gewöhnlich in Verbindung mit anderen Erscheinungen vorgenommen wird. Mit der Bezeichnung Ei pflegt man recht verschiedene Dinge zu belegen, was sich praktisch schwer vermeiden läßt und daher auch in den vorstehenden Ausführungen geschah. So spricht man von einem „Ei" als dem ganzen mit den Eihüllen ausgestatteten Gebilde, wie wir es etwa im Vogelei kennen, andererseits nennt man Eier und Eizellen auch die hüllenlosen, jüngeren und älteren weiblichen Keimzellen deren Kern das Keimbläschen ist und an denen sich also die Reifungsteilungen noch nicht vollzogen haben. Andererseits belegt man mit dem Namen Eizellen auch diejenigen Eier, welche den Reifungsprozeß bereits durchmachten. Obwohl dieser Vorgang erst am Schluß der Eibildung stattfindet, wird es aus den angegebenen Gründen wünschenswert sein, ihn schon an dieser Stelle kennen zu lernen, wenn dies auch allerdings hier nur ganz kurz geschehen kann und im übrigen auf den Artikel „Befruchtung" verwiesen werden soll.

Wenn das Ei seine völlige Ausbildung erlangt hat und der Befruchtung entgegengeht, so vollzieht sich an ihm jener Vorgang, der schon lange als Bildung der Richtungskörper bekannt ist. Er besteht in der Haupt-

Digitized by Google

sache darin, daß die ungereifte, mit Keimbläschen versehene „Eizelle“ eine zweimalige Teilung durchmacht, welche zur Bildung einer großen Zelle, der gereiften Eizelle und zweier oder dreier kleiner Zellen, der sogenannten Richtungskörper führt (Fig. 31).

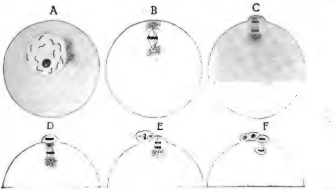


Fig. 31. Verlauf der Eireifung vom Keimbläschenstadium mit Chromosomen und Centrosomen (A) bis zur Ausbildung der ersten und zweiten Reifungsspindel (B—E) und Abschnürung der beiden Richtungskörper (C—F).

Eingeleitet wird die Teilung dadurch, daß das Keimbläschen an die Peripherie des Eies und zwar gewöhnlich an den protoplasmareichen animalen Pol rückt, wobei die Kernmembran schwindet, die färbbare Substanz des Kernes Chromosomen liefert und der Nucleolus verloren geht, am Rande aber ein sich teilendes Centrosoma mit den Strahlungen auftritt (Fig. 31 A). An der Eiperipherie bildet sich also eine Kernspindel mit Aequatorialplatte (vgl. den Artikel „Zellteilung“); die sich weiter ausbildende, mit den beiden Tochterplatten versehene erste Reifungs- oder Richtungsspindel rückt mit ihrem äußeren Teil in eine hügelförmige Verwölbung des Ooplasmas hinein (Fig. 31 A und B). Indem letztere sich abschnürt, ist die erste Reifungsteilung vollzogen und der erste Richtungskörper gebildet. Dieser sowohl wie die übrig gebliebene große Zelle gehen sofort eine neue Teilung ein, indem die beiden Tochterplatten zur Aequatorialplatte je einer im ersten Richtungskörper und im Ooplasma gelegenen zweiten Reifungsspindel werden (Fig. 31 D und E). So wird der zweite Richtungskörper gebildet und der erste teilt sich in zwei kleine Zellen (F). Der im Ooplasma zurückbleibende, ziemlich kleine und chromatinarme Kern wird zum „Eikern“ oder „weiblichen Vorkern“. Infolge seines geringen Gehaltes an färbbarer Substanz erscheint er hell und ist im Vergleich mit dem gewöhnlich sehr umfangreichen Keimbläschen recht unansehnlich. Später bei der Befruchtung vereinigt er sich mit dem Spermakern zur Bildung des Furchungskerns oder der Furchungsspindel. Das Ei ist also jetzt befruchtungs- und entwickelungsfähig. Auf die wichtige Bedeutung des hier kurz geschilderten Vorgangs, auf die vielfachen Modifikationen, welche er zumal im Hinblick auf der Verhalten des Chromatins erfährt, sowie auf die weitgehenden theoretischen Folgerungen, welche man zumal im Hinblick auf das Vererbungsproblem daraus gezogen hat, kann hier nicht eingegangen werden (vgl. die Artikel „Befruchtung“ und „Vererbung“). Dagegen muß auf die Konsequenzen hingewiesen werden, welche sich aus dem Vorgang der Reifungsteilung für die Auffassung der Eizelle ergeben.

Es ist ersichtlich, daß die Keimzelle vor dem Vollzug der Reifungsteilung nicht den gleichen Wert haben kann wie diejenige nach geschehener Abgabe der Richtungsköper und daß man sie nicht wohl mit derselben Bezeichnung Ei oder Eizelle belegen sollte, wie es zumeist geschieht und zwar deshalb geschieht, weil die morphologische Beschaffenheit des Eies durch den ganzen Prozeß kaum beeinflußt wird. Eine gewisse Klärung dieser Verhältnisse ergibt sich aus dem Vergleich mit den bei der Bildung der Spermatozoen sich vollziehenden letzten Teilungen. Man muß dabei auf die Ursamenzellen zurückgehen, welche den bildungsfähigen Abschnitt der männlichen Keimdrüse erfüllen und in fortgesetzter Vermehrung begriffen sind; sie liefern die sogenannten

Spermatogonien, die zu den Spermatocyten heranwachsen und dabei gewisse Umbildungen ihres Zellkörpers erfahren. Die letzten beiden Teilungen dieser Zellen sind es nun, welche sich ohne weiteres mit den Reifungsteilungen der weiblichen Keimzellen vergleichen lassen. Eine Spermatocyte erster Ordnung liefert in der ersten Reifungsteilung zwei Spermatocyten zweiter Ordnung (Fig. 32 A bis C) und jede von diesen durch den

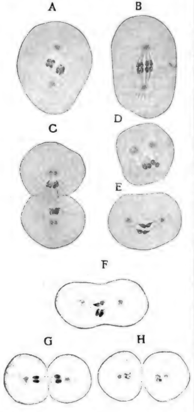


Fig. 32. Verlauf der Samenreifung beim Pferdespulwurm (Ascaris megalocephala bivalens). A—C Spermatocyten I. Ordnung, D—H Spermatocyten II. Ordnung oder Spermatiden (H). Nach A. Brauer.

entsprechenden Vorgang, wie er oben von der zweiten Reifungsteilung des Eies beschrieben wurde, zwei sogenannte Spermatiden (D bis H), d. h. diejenigen Zellen, welche sich direkt zu den Spermatozoen umbilden Hier sind also vier funktionsfähige Zellen entstanden, während dort nur eine solche, die gereifte Eizelle und drei kleine bei der Embryonalentwickelung zugrunde gehende Zellen, die Richtungskörper, geliefert werden. Sie sind nichtsdestoweniger Zellen und der Vergleich mit jenen männlichen Zellen legt es nahe, sie als zurückgebildete, abortive Eizellen zu betrachten.

In Analogie mit den männlichen Keimzellen spricht man auch im weiblichen Geschlecht von Oogonien und Oocyten, von denen sich die Oocyten erster Ordnung bei der ersten Reifungsteilung in die beiden Oocyten zweiter Ordnung und diese in je zwei Oiden (gereifte Eizelle und zweiter Richtungskörper oder die Teilprodukte des ersten Richtungskörpers) teilt. Hiernach wäre es angezeigt, die heranwachsenden weiblichen Keimzellen nur als Oocyten zu bezeichnen und den Namen Eizelle für die gereiften Zellen zu verwenden, d. h. für diejenige Zelle, welche mit der gereiften und ausgebildeten Samenzelle zum Befruchtungsakt zusammentritt. Aber ebensowenig wie bei den männlichen hat sich dies bei den weiblichen Zellen recht durchführen lassen, was wohl damit zusammenhängt, daß die weiblichen Keimzellen vor wie nach der Reifungsteilung ungefähr gleiche Struktur und Größe zeigen. Bedient man sich, wie es zumeist geschieht, des Sammelbegriffs Eizellen für die weiblichen Zellen im nicht gereiften und gereiften Zustand, so muß man sich nur dessen bewußt sein, daß man es mit zwei recht verschiedenen Stadien der Oogenese zu tun hat.

III. Eibildung (Oogenese).

Von einem Teil der Eibildung mußte schon in den beiden vorhergehenden Abschnitten gesprochen werden, da sie sich schwer von der Morphologie des Eies und seiner Reifung trennen läßt. So wurde besonders die eigentliche Ausbildung des Eies und die Dotterbildung, bei denen auch Beziehungen zwischen Kern und Ooplasma in Betracht kommen, in Verbindung mit der Morphologie besprochen. Hier handelt es sich hauptsächlich um die Beziehungen der Oocyten zu anderen Zellen des Körpers und vor allem zu denen, mit welchen sie bei ihrer Ausbildung in nähere Verbindung tritt.

1. Die verschiedenen Formen der Eibildung. Als primitivste Form der Eibildung wird man diejenige bezeichnen müssen, bei welcher die Eizellen regellos im Körper des Muttertiers verteilt sind, wie man dies bei den Schwämmen findet (Fig. 1). Die jungen Eizellen zeigen amöboide Gestalt (Fig. 1 und 45 A), wie dies auch bei

Digitized by Google

den Zellen des Körperparenchyms der Fall sein kann; so sind sie von diesen schwer zu unterscheiden und werden auch direkt von ihnen hergeleitet (F. E. Schulze, Jörgensen 1910). Amöboide, über einen beträchtlichen Teil des Körpers verstreute Keimzellen kommen auch bei den Hydroidpolypen vor, bei denen sie nicht nur Wanderungen in den Epithelschichten ausführen, sondern auch von einem in das andere Keimblatt vordringen (Fig. 33 und 34), um ihre endgültige Lagerstätte aufzusuchen. Die Keimzellen bilden dann eine Gonade, wie übrigens eine gruppenweise Zusammenhäufung zur Bildung eines noch recht primitiven Ovariums auch schon bei den Schwämmen eintreten kann. Die diffuse geht dann in eine lokalisierte Eibildung über, wie sie den allermeisten Tierformen zukommt. Die Bildung erfolgt also im allgemeinen in den Gonaden, den weiblichen Keimdrüsen, die man als Eierstöcke oder Ovarien bezeichnet. Diese selbst sind unter Umständen nur mehr oder weniger umfangreiche Zellenhaufen, die durch fortgesetzte Zellwucherung entstanden (Fig. 35). Umgeben sie sich mit einer bindegewebigen oder epithelischen Membran, so hat man bereits besser abgeschlossene Ovarien vor sich. Diese können plattenförmig, sack- oder schlauchförmig, traubenförmig verzweigt und von manchen anderen Formen sein. In ihnen liegen die jüngeren und älteren Ausbildungsstufen der Keimzellen entweder dicht gedrängt in einem massigen Keimlager oder in Form eines Keimepithels (Fig. 36 und 37); sie lösen sich dann ab und gelangen in einen zentralen Hohlraum, welcher direkt oder indirekt in Verbindung mit dem Leitungsapparat steht, durch welchen die Eizellen nach außen geführt werden.

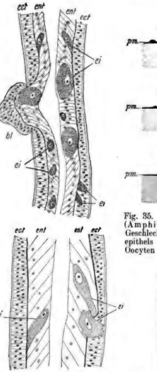


Fig. 33 u. 34. Längsschnitte durch einen Zweig eines Hydroidpolypen (Eudendrium racemosum) mit wandernden Oocyten (ei) im Ectoderm (ect) und Entoderm (ent), sowie Durchbrechen der Stützlamelle zum Durchtritt von einem in das andere Keimblatt, bl Blastostylknospe. Nach A. Weismann.

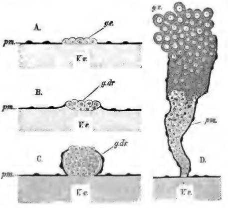


Fig. 35. Entwickelung des Eierstocks eines Ringelwurms (Amphitrite rubra). A—C Keimepithel (ge) und Geschlechtsdrüse (gdr) als Wucherung des Peritonealepithels (pm), D Ovarium mit sich loslösenden Oocyten (gz), Vv = dr Bauchgefäß. Nach E. Meyer.

In den Ovarien können recht verschiedenartige Zellen enthalten sein, je nachdem sich die Ausbildung des Eies in einfacher oder komplizierter Weise vollzieht. Vor allen Dingen lassen sich jedoch in der Eibildung drei Perioden unterscheiden, nämlich eine solche, während der sich die Keimzellen noch in Vermehrung (Teilung) befinden,

Digitized by Google

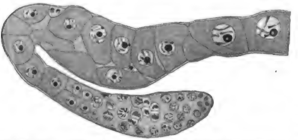


Fig. 36. Längsschnitt durch Eierstock und Eileiter eines Ruderfüßers (Canthocamptus staphylinus). Nach V. Haecker.

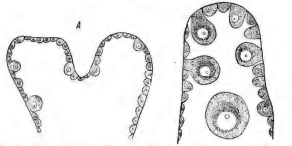


Fig. 37. Blindes Ende des Eierstocksschlauches von Seesternen mit Keimepithel, jüngeren und älteren Eiern. Nach H. Ludwig.

eine zweite, die Wachstumsperiode, in welcher das Ei seiner Ausbildung entgegengeht und eine dritte, die Reifungsperiode, d. h. diejenige des Vollzugs der beiden Reifungsteilungen, oder der Abschnürung der Richtungskörper. Im Gegensatz zu der Ausbildung der männlichen Zellen erfolgt der letztere Vorgang meistens nicht mehr in der Keimdrüse, sondern im Leitungsapparat oder außerhalb des mütterlichen Körpers. Obgleich er also den Abschluß der Oogenese darstellt, mußte er aus den oben angegebenen Gründen bei unserer Darstellung bereits vorweg genommen werden.

Eines besonderen, bei einer Anzahl, aber nicht vielen Tierformen vorkommenden Verhaltens muß hier gedacht werden, nämlich der Entstehung männlicher und weiblicher Keimzellen in ein und derselben Keimdrüse, die man dann als Zwitterdrüse bezeichnet. Bei einigen Nemertinen (Schnurwürmern) und Anneliden (Ringelwürmern) bilden sich aus den als peritoneale Wucherung entstandenen Keimdrüsen (Fig. 35) außer Oocyten auch Samenbildungszellen und Spermatozoen heraus. Aehnliches findet sich in den Keimdrüsen einiger Stachelhäuter (Asterina, Amphiura, Synapta) und gelegentlich bei anderen Tieren, vor allen Dingen jedoch als ganz regelmäßiges Verhalten bei vielen Weichtieren (Lamellibranchiaten, Pulmonaten, Opisthobranchiern und Ptero-

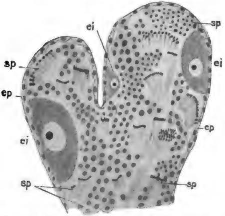


Fig. 37a. Ein kleines Stück von der Zwitterdrüse der Weinbergsschnecke im Durchschnitt; ei Oocyten, ep Keimepithel, sp Spermatogonien, Spermatocyten und Spermatiden.

Digitized by Google

poden). Bei ihnen liegen außer dem Keimepithel an der Wand der Zwitterdrüse Nährzellen, sowie weibliche und männliche Keimzellen in ihren verschiedenen Ausbildungsstufen (Fig. 37 a); man hat also eine echte Zwitterdrüse vor sich. Dafür, daß nicht etwa eine Schädigung durch zu früh eintretende Befruchtung eintritt, ist insofern gesorgt, als die weiblichen und gewiß auch die männlichen Geschlechtszellen innerhalb der Zwitterdrüse oder im Anfang des Leitungsapparates noch nicht die nötige Reife erlangen. Ueberhaupt kann in derartigen, beiderlei Geschlechtsprodukte erzeugenden Keimdrüsen die Reife der männlichen Geschlechtszellen derjenigen der weiblichen vorausgehen (Protandrie), oder es kann auch das Umgekehrte der Fall sein, nämlich daß die männlichen Zellen in der Reife den weiblichen erst folgen (Protogynie).

Außerhalb wie innerhalb des Eistocks kann sich die weibliche Keimzelle entweder für sich zum Ei heranbilden oder sie vermag es nur mit Unterstützung anderer Zellen zu tun; im ersteren Fall spricht man von einer solitären, im letzteren von einer alimentären Eibildung. Bei der letzteren ist wieder zu unterscheiden, ob die „Hilfszellen" die Oocyte in einer (mehr oder weniger regelmäßigen) Schicht umgeben oder ihr vereinzelt oder gruppenweise anliegen, welches Verhalten man als follikuläre und nutrimentäre Eibildung unterscheidet.

Vielleicht sollte man erwarten, die einfacheren Formen der Eibildung bei den niederen Tieren, die komplizierten hingegen bei höher organisierten Tieren zu finden, doch ist dies nicht der Fall, denn schon bei den Schwämmen trifft man einen aus platten Zellen bestehenden, das Ei vom umgebenden Körperparenchym trennenden Follikel an. Ebenso werden bei den Schwämmen und Hydroidpolypen auch bereits Nährzellen in Verbindung mit Oocyten gefunden. Die Verteilung der einzelnen Formen der Eibildung auf die verschiedenen Abteilungen des Tierreichs oder die Art ihres Vollzugs bei ihnen zu verfolgen, kann nicht die Aufgabe dieses Artikels sein, vielmehr soll nur an einer Anzahl herauszugreifender, besonders charakteristischer Beispiele gezeigt werden, in welcher recht verschiedenartigen Weise die Eibildung vor sich geht.

2. Die solitäre Eibildung. Von dem eine dichte Zellenmasse bildenden Keimlager (Fig. 36) oder von dem das Ovarium auskleidenden Keimepithel (Fig. 37) sondern sich einzelne Oocyten, runden sich ab und vergrößern sich in der schon früher besprochenen Weise durch Ablagerung von Dottersubstanzen in ihrem Ooplasma (Fig. 35 bis 37). Zuweilen bleibt die Oocyte, auch wenn sie sich weiter in die Höhlung des Ovariums vordrängt, mit der Wand wie durch einen Stiel verbunden, welcher in manchen Fällen recht lang wird und als Ernährungsapparat der Oocyte dienen kann, wie man dies von Actinien, Echinodermen, Nematoden, Muscheln und anderen Tieren kennt. Bei den Nematoden verbindet der Stiel die Oocyte übrigens nicht mit der Wand der Eierstocksröhre, sondern mit einem in der Mitte übrig bleibenden Strang (Rhachis), dem sicher ebenfalls ernährende Funktion zukommt.

3. Die alimentäre Eibildung. Die alimentäre Eibildung ist im Tierreich verbreiteter als die solitäre; daß sich mehrere Zellen an der Ausbildung eines Eies beteiligen, ist also die häufigere Erscheinung. Diese Zellen sind verschiedener Art und während es sich bei den Follikelzellen im allgemeinen um somatische Zellen handelt, dürften als eigentliche Nährzellen mehr solche Zellen in Betracht kommen, die mit den Eizellen gleichen Ursprungs, also propagatorische Zellen sind. Freilich wird man dies nicht ohne weiteres für alle Nährzellen behaupten dürfen, sondern es gibt auch follikuläre Zellen, welche Nährfunktion übernehmen können, so daß diese beiden Formen der Eibildung ineinander übergehen. Auf diesen Punkt wird noch zurückzukommen sein.

3a) Die follikuläre Eibildung. Die follikuläre Eibildung besteht im einfachsten Fall darin, daß Zellen des umgebenden Gewebes sich mehr oder weniger regelmäßig um das Ei anordnen (Fig. 38). Bei den Schwämmen

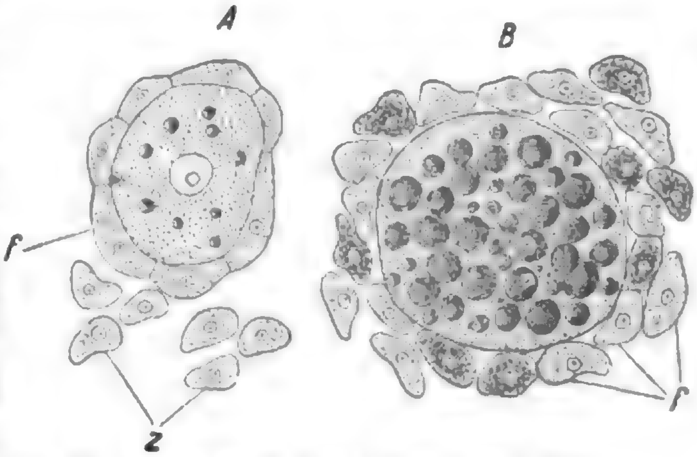


Fig. 38. Jüngere und ältere Oocyte vom Süßwasserschwamm, erstere mit wenig, letztere mit mehr Dotterinhalt, beide von Follikelzellen (f) umgeben; z Zellen des Schwammparenchyms. Nach Fiedler.

sind es, wie schon erwähnt, Parenchymzellen, die das tun oder bei den Seerosen wachsen die Oocyten in eine Bindegewebsschicht hinein, deren Zellen infolge der Vergrößerung der Oocyte ähnlich, wie es bei den Schwämmen und anderen Tieren der Fall sein kann,

Digitized by Google

in einer Lage stark abgeplatteter Zellen das Ei umgeben. Zuweilen, wie bei manchen Echinodermen, sind es nur zerstreute Zellen, die dem Ei anliegen, meistens aber schließen sich die Zellen zu einer Epithellage zusammen und, indem sie kubische oder sogar höhere, bis zylinderförmige Gestalt annehmen, bildet sich eine recht dicke, meist einschichtige, unter Umständen, wie beim Follikel der Wirbeltiere, sogar mehrschichtige Lage um das Ei aus (Fig. 39 bis 42).

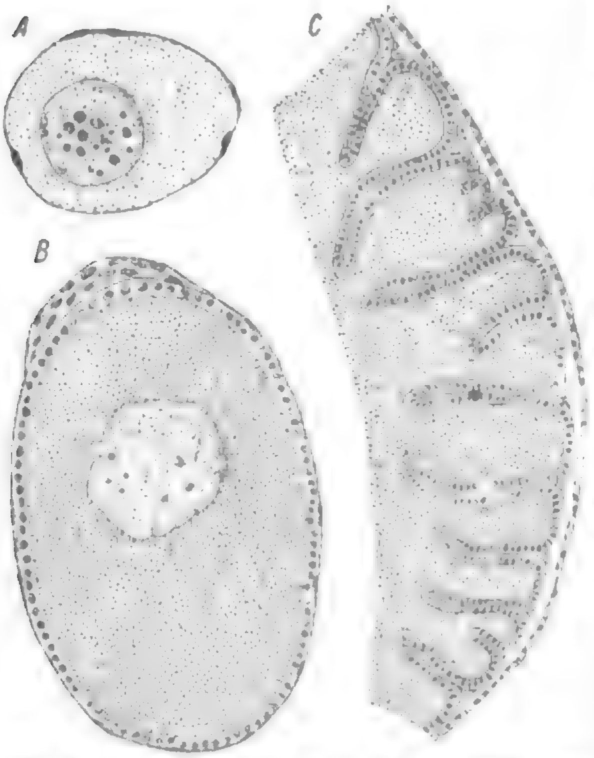


Fig. 39. Jüngere Eifollikel (A, B) und Stück eines älteren Follikels (C), letzterer mit gefalteter Epithellamelle von Sepia officinalis. Nach Vialleton und Ray Lankester.

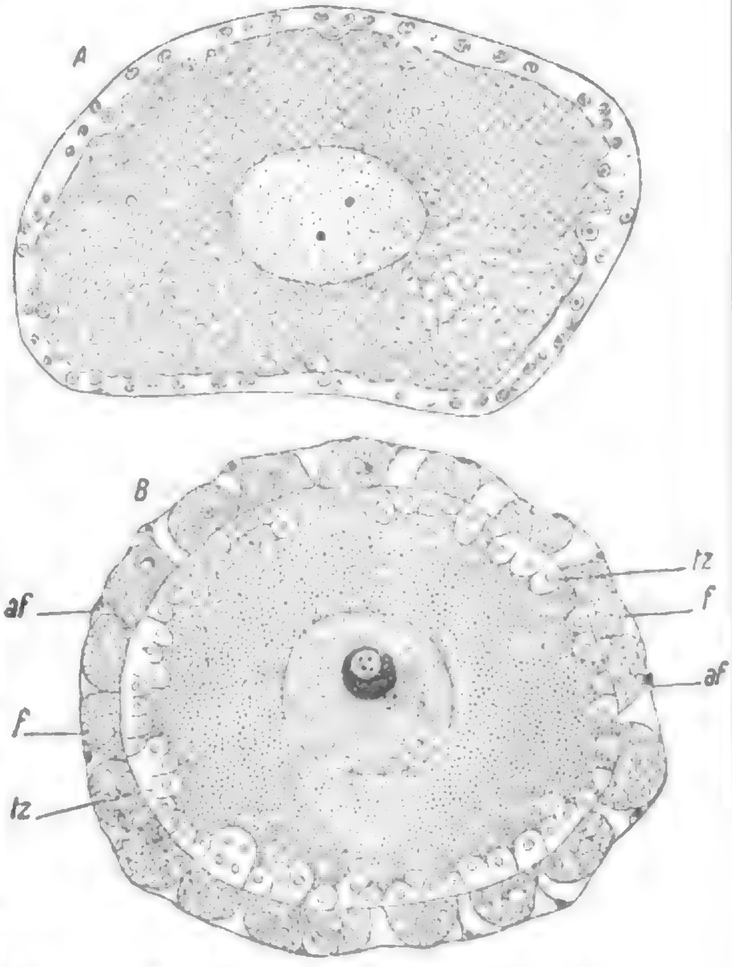


Fig. 40. Eifollikel von Styela rustica (A) und Ciona intestinalis (B) mit Testazellenschicht (tz) inneren Epithel, (f) und äußere Epithelschicht (af). Nach Floderus.

Ist die Epithellage um das Ei eine völlig geschlossene, so kann es nicht anders sein, als daß die für die Ernährung und Vergrößerung nötigen Substanzen durch Vermittelung des Follikelepithels in das Ooplasma hinein gelangen, so daß ihm also nicht nur eine schützende, sondern auch ernährende Funktion zukommt. Letzteres ergibt sich mit ziemlicher Sicherheit aus besonderen Einrichtungen, welche das Follikelepithel gelegentlich aufweist, nämlich aus der Bildung von zahlreichen Falten, wie sie bei den dotterreichen Eiern mancher Insekten, Cephalopoden und Selachier in späteren Stadien der Eibildung an der Innenfläche des Follikels auftreten und tief in den Eidotter hinein reichen können (Fig. 39). Es ist anzunehmen, daß dies zu dem Zweck geschieht, um die Berührungsfläche zwischen Ei und Follikelepithel zu vergrößern und die Abscheidung des Nährmaterials von seiten des letzteren zu verstärken. Außer der schützenden und ernährenden Funktion kann dem Eifollikel auch noch eine andere Aufgabe zufallen, nämlich die sekundäre Eihülle, das Chorion, abzuscheiden. Für das Studium dieses Vorgangs haben sich die Insekten als besonders günstige Objekte erwiesen. Bei ihnen und gewiß auch bei anderen Tieren wird das Chorion zuerst in Form einer dünnen Cuticula abgeschieden, die sich allmählich verstärkt und dabei die oft recht komplizierte Struktur annimmt, welche dem Chorion eigen sein kann und schon weiter oben besprochen wurde. Die im Chorion häufig vorhandenen Poren verdanken feinen Zellfortsätzen ihre Entstehung, welche später wieder zurückgezogen werden. Die durch erhabene Leisten markierte Felderung der Oberfläche, ebenfalls eine häufige Erscheinung, entspricht der Umgrenzung der Zellen und breite Fortsätze der letzteren können noch in den Zellen wurzeln (Fig. 22 A). Die verschiedenartige Struktur der Chorionschichten zeigt, daß die Follikelzellen befähigt sind, nacheinander verschiedene Sub-

Digitized by Google

stanzen abzuscheiden. Auf eine Beteiligung an der Ausbildung des Eies ist die bei den Ascidien zu beobachtende Erscheinung zurückzuführen, daß sich einzeln oder gruppenweise Zellen an der Innenfläche des Eifollikels erheben, um sich sodann aus dem Verbande des Epithels zu lösen und in das Ooplasma zu rücken (Fig. 40). Es sind die sogenannten Testazellen der Ascidien, welche sich im Dotter verteilen, um hier aufgebraucht zu werden oder aber nach Erfüllung einer besonderen Aufgabe (Verarbeiten der bei der Dotterbildung restierenden peripheren Chromatinmasse nach Schaxel 1910) das Ooplasma wieder zu verlassen und erst später an der Peripherie des Eies oder Embryos dem Untergang zu verfallen. Sie haben sich eine Zeitlang „Hilfe leistend" an der Ausbildung des Eies beteiligt, weshalb Schaxel von einer „auxiliären Eibildung" spricht.

Das Follikelepithel selbst ist bei den Ascidien auf „abortive Eizellen", d. h. Oogonien zurückgeführt worden, die unter dem übermächtigen Einfluß der Eizelle in ihrer Ausbildung zurückblieben und zu bloßen Hilfszellen herabsanken. Die Eibildung der Ascidien zeigt insofern noch besondere Verhältnisse, als nach dem Auftreten der merkwürdigen und in ihrer Bedeutung schwer zu verstehenden Testazellen, die eine Innenschicht am Follikel bilden, noch eine äußere, aus platten Zellen bestehende Follikellage zustande kommt, wodurch das Ei nunmehr von drei Zellenschichten umgeben erscheint (Fig. 40 B). Wenn das Ei den Eierstock verläßt, bleibt die äußere Follikelhülle in diesem zurück, indem sie sich vom inneren Follikelepithel ablöst; die übrigen Hüllen werden aber mit dem austretenden Ei ausgestoßen, ja die inneren Follikelzellen vergrößern sich sogar zu papillenartigen Anhängen des Eies, was ihm ein recht eigenartiges Ansehen verleiht (Fig. 41). Sonst pflegt das Ei nach erlangter Ausbildung den Follikel zu durchbrechen, der dann im Eierstock zurückbleibt und allmählich resorbiert wird, während das Ei aus dem Ovarium in den Leitungsapparat gelangt.

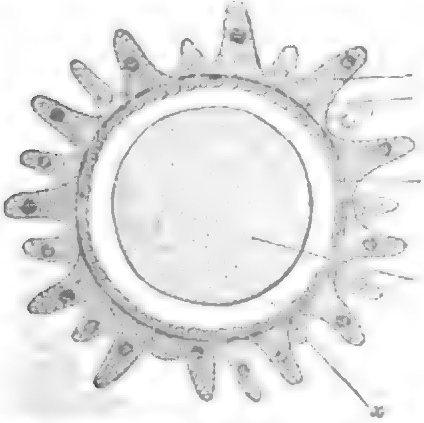


Fig. 41. Reifes Ei von Ascidia canina, a Chorion, c Follikelzellen, e Testazellen, f Eizelle, x gallertige Außenlage des Eies. Nach Kupffer.

Mehrschichtige Follikel kommen besonders auch den Wirbeltieren zu. Im Anfang ihrer Ausbildung aus einer dünnen Lage platter oder kubischer Zellen bestehend, können sie diesen Zustand beibehalten, wie man dies gewöhnlich bei Knochenfischen und Amphibien findet; doch tritt insofern eine weitere Ausbildung des Follikels ein, als die Zahl der Zellen sich bedeutend vermehrt, wodurch sie sich ineinander schieben und der Follikel mehrschichtig wird. Außerdem aber nehmen einzelne Zellen an Größe sehr bedeutend zu und erscheinen dadurch fast wie umfangreiche Drüsenzellen zwischen den kleineren Follikelzellen; möglicherweise haben sie auch eine derartige Funktion und dienen zur Ausscheidung von Nährsubstanz für das Ei. Derartige komplizierter gebaute Follikel besitzen die Selachier und sie kommen ebenfalls den Reptilien zu, bei denen die großen Zellen eine recht regelmäßige Anordnung erlangen und der ganze Eifollikel dadurch überhaupt sehr regelmäßig gebildet erscheint (Fig. 42). Die umfangreichen Follikel mit

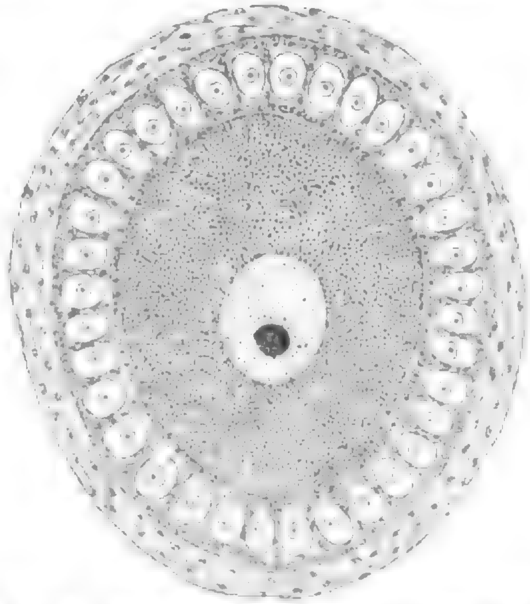


Fig. 42. Eierstocksei von Lacerta agilis mit mehrschichtigem Follikelepithel und umgebendem Bindegewebe. Nach C. K. Hoffmann.

den großen dotterreichen Eiern buchten sich über die Eierstockswand vor und verleihen diesem ein traubiges Aussehen, wie es von den Ovarien der Vögel bekannt ist. Auf diese soll hier weiter nicht eingegangen werden, dagegen ist den Follikeln der Säugetiere eine kurze Betrachtung zu widmen, da sie von besonderer Beschaffenheit und wegen der auch beim Menschen obwaltenden Verhältnisse von Interesse sind. In der Jugend, wenn sie sich von den Pflügerschen Schläuchen des

Digitized by Google

Eierstocks sondern, umgeben die Follikel als einschichtige Epithellage das Ei, werden aber infolge ihrer starken Vermehrung mehrschichtig, worauf ein Spaltraum in der Masse der Follikelzellen auftritt (Fig. 43 A).

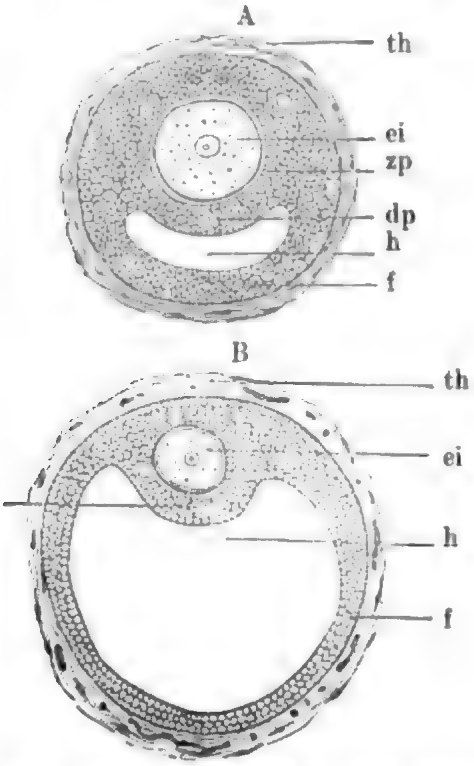


Fig. 43. Graafsche Bläschen in zwei Entwickelungsstadien, dp Discus proligorus, ei Ei, f Follikelzellen, h Hohlraum des Follikels, th Teca folliculi (bindegewebige Hülle), zp Zona pellucida (Eimembran).

Indem sich dieser beträchtlich erweitert, nimmt der Follikel die Beschaffenheit eines Bläschens mit weiter Höhlung an, in dessen eiartig verdickter Wand, dem Discus proligerus die Oocyte liegt (Fig. 43 und 44). Letztere isoliert sich später noch mehr von der Wand und man hat jetzt das „Graafsche Bläschen" der Säugetiere mit seinem weiten Hohlraum und dem darin liegenden Ovulum vor sich (Fig. 43), das von der Eihaut (Zona pellucida) umgeben ist. Durch Platzen des Follikels gelangt das Ei bei der sogenannten Ovulation aus dem Ovarium in die Bauchhöhle und von da durch das Ostium tubae in den Eileiter, während sich an seiner Stelle im Eierstock infolge des Blutergusses und eintretender Gewebswucherungen das Corpus luteum blidet.

3b) Die nutrimentäre Eibildung. Die nutrimentäre Eibildung kann insofern mit der follikulären im engen Zusammenhang stehen, als das Follikelepithel die Ernährung des Eies mit besorgt, worauf oben schon wiederholt hingewiesen wurde oder aber einzelne Follikelzellen als „Nährzellen" Verwendung finden. Das kann in der Weise geschehen, daß einige Zellen sich stark mit Nährsubstanzen beladen, welche sie an die wachsende Oocyte abgeben (Fig. 38 B). Nach Jörgensens neueren Beobachtungen erfolgt bei Sycandra eine lebhafte Aufnahme umliegender Zellen, anscheinend

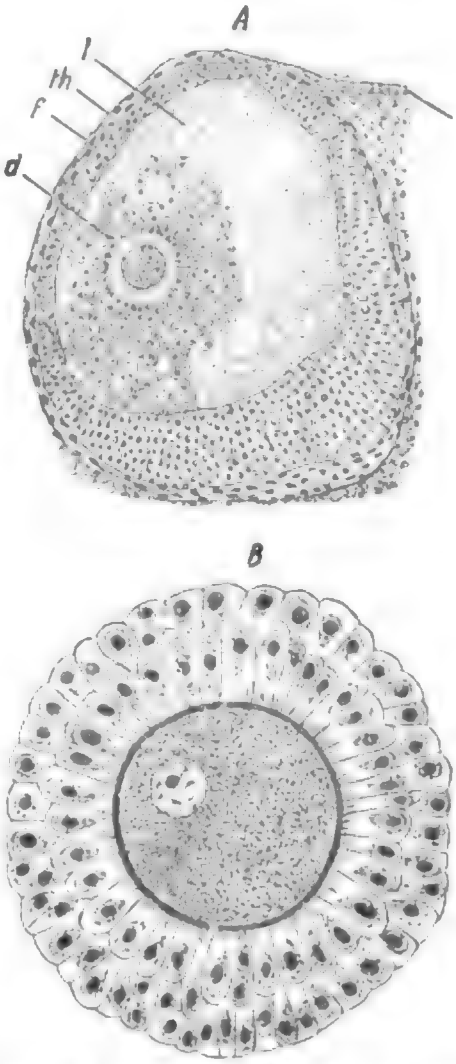


Fig. 44. A Sprungreifer Follikel der Maus, B Eierstocksei mit Discus proligerus (d) und Zona pellucida, l Liquor folliculi, die übrigen Buchstaben wie in Fig. 43. Nach Sobotta.

Oogonien, durch die Oocyte (Fig. 45 B, C), ein förmliches Verschlingen und Auffressen dieser Zellen. Bei der Weinbergsschnecke ist zu beobachten, wie einzelne der das Ei follikelartig umgebenden Zellen sich aus dem Verbande der übrigen lösen, um in das Ooplasma einzutreten und hier aufgelöst zu werden (Fig. 45 D). Dieses Verhalten erinnert an dasjenige der Ascidien (Fig. 40), obwohl deren Testazellen nicht, wie man vermuten sollte, bei der Ernährung des Eies mit Verwendung finden, sondern nach neuen Angaben das Ooplasma wieder verlassen sollen. Unter Umständen können ganze Gruppen von Follikelzellen der Nähr-

funktion zugeführt werden, indem sie sich bedeutend vergrößern und sich auf die Produktion von Nährsubstanz einrichten. Im allgemeinen jedoch dürften die Nährzellen

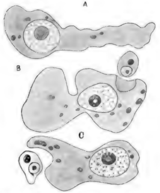


Fig. 45. A—C Amöboide Eizellen von Sycandza raphanus, A in langgestrecktem Zustand, B u. C im Begriff eine Nährzelle aufzunehmen; die dunklen Körner im Ooplasma sind Chromidien der Nährzellen. Nach Jörgensen 1910.

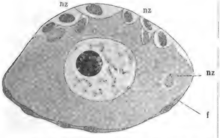


Fig. 45. D. Eierstocksei der Weinbergschnecke mit Keimbläschen und Keimfleck, sowie umgebendem Follikelepithel (f) und Nährzellen (nz). Nach Obst.

anderen Ursprungs, d. h. im Anfang gleichartig mit den Oocyten und somit als „abortive Eizellen" aufzufassen sein, was allerdings, wie oben erwähnt, auch für manche Follikelzellen angegeben wird.

Dies tritt besonders in solchen Fällen deutlich hervor, wenn dem Ei nur eine einzige Nährzelle beigegeben wird und diese anfangs der Oocyte noch sehr ähnlich ist, um erst später mit dem Wachstum und weiteren Ausbildung einen anderen Ckarakter zu gewinnen, wie es bei Ophryotrocha der Fall ist. Der Kern der Oocyte nimmt mehr die Struktur des Keimbläschens an, während derjenige der anderen Zelle sehr groß und chromatinreich wird und dabei auch eine unregelmäßige Gestalt erhält (Fig. 46), kurz

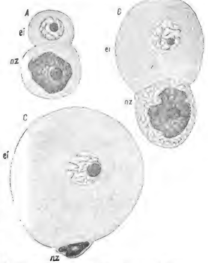


Fig. 46. A—C Jüngere und ältere Oocyten (ei) aus der Leibeshöhle von Ophryotrocha puerilis; ei Eizelle, nz Nährzelle.

Merkmale zeigt, wie sie den Kernen sezernierender Zellen mit Vorliebe zukommen; mit einer für die heranwachsende Oocyte Nährsubstanzen produzierenden und abscheidenden Zelle hat man es gewiß auch zu tun. Das eigenartige Verhalten wird noch dadurch verstärkt, daß die beiden miteinander vereinigten Zellen sich schon frühzeitig von der das Ovarium darstellenden peritonealen Zellenwucherung ablösen und in die Leibeshöhle des Anneliden fallen. Hier flottiert das aus der wirklichen und abortiven Oocyte bestehende Zellenpaar in der Leibeshöhlenflüssigkeit; die anfangs größere Nährzelle (Fig. 46 A) wird bald von der stark heranwachsenden Eizelle übertroffen (B) und von ihr aufgezehrt, so daß sie schließlich nur noch als ein kleines Anhängsel (mit dem großen, stark gefärbten Kern darin) der Oocyte ansitzt (Fig. 46 C), bis auch dieses verloren geht und damit die ursprüngliche Keimzelle völlig abortiv geworden ist.

Die Beigabe nur einer Zelle von gewiß entsprechendem, d. h. Keimzellencharakter

Digitized by Google

an die heranwachsende Oocyte ist ein im ganzen recht seltenes Vorkommnis; bei einigen Anneliden sind es Gruppen von Zellen, die der ebenfalls frei in der Leibeshöhle flottierenden Oocyte anhängen, bei Myzostoma nur zwei, eine an jedem Eipol, nach v. Graffs und Wheelers Angabe, die jetzt durch Mc Clendons Beobachtung bestätigt wird. Nur eine Nährzelle wird dem Ei bei den bekannten parasitischen Rankenfüßern Sacculina carcini und Lernaeodiscus galatheae beigegeben, so daß die Verhältnisse hier ähnlich wie bei Ophryotrocha liegen dürften. Wahrscheinlich entsteht die Nährzelle mit der Oocyte durch Teilung einer Oogonie, wie dies in derartigen Fällen zu vermuten ist.

Nur nebenbei sei erwähnt, daß die Beigabe von Nährzellen zum Ei bei den Cirripedien (Rankenfüßern) kein notwendiges Verhalten darstellt, sondern daß bei manchen von ihnen (Lepas, Pollicipes, Alcippe, Dendrogaster u. a.) die Oocyten ohne die Beihilfe von Nährzellen zum Ei heranwachsen. Es sei in dieser Beziehung auf die Arbeiten von Gruvel, Berndt, Kollmann und O. le Roi verwiesen; die Angaben von A. Gruvel über die mit Beteiligung von Phagocyten unter histolytischen Vorgängen verlaufende Eibildung von Scalpellum sind einer eingehenden Nachprüfung wert.

Im Besitz nur einer Nährzelle, welche der Oocyte beigefügt wird, ist unter den Insekten Forficula (Fig. 47), doch ist das Bild in diesem Fall insofern ein ganz anderes, als es sich um einen Eischlauch (Eiröhre) mit umgebendem Follikelepithel handelt, der

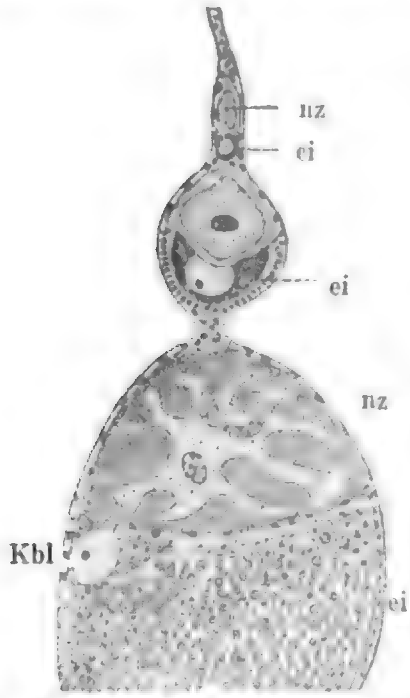


Fig. 47. Eiröhre von Forficula auricularia. ei Eizelle, nz Nährzelle, Kbl Keimbläschen.

sich aus mehreren hintereinander liegenden Nähr- und Eifächern zusammensetzt (Fig. 47). In diesem Fall ist die Differenzierung der dem Ei beigegebenen Zelle nach der Richtung der Sekretion insofern noch weit auffälliger, als der äußerst umfangreiche Kern sich späterhin stark verzweigt (Fig. 47), wie man es nicht selten bei sezernierenden Zellen findet. Daß es sich dabei um eine abortive Eizelle handelt, wird man um so weniger bezweifeln, als der Beweis für die Nährzellen anderer Insekten direkt geführt werden konnte.

Wie schon erwähnt wurde, ist die Zahl der dem Ei beigefügten Nährzellen gewöhnlich eine größere; sie steigt von einigen wenigen bis zu vielen, 50 und mehr Zellen; erwähnt sei hier noch das Beispiel eines Anneliden (Tomopteris elegans), bei welchem sich im Ovarium Abteilungen von je 8 Zellen unterscheiden lassen, die anfangs ganz gleichartig sind, sich jedoch bald in eine größere, dotterreiche Oocyte und sieben Nährzellen differenzieren (Chun, Fullarton, Bergmann, Dons u. a.) (Fig. 48). Aehnlich liegen die Verhältnisse offenbar bei anderen Anneliden, bei denen die Anzahl der Nährzellen, wie z. B. bei Onuphis tubicola, wächst. Recht groß ist die Zahl der Nährzellen bei einem Blutegel, Piscicola geometrica, dessen Verhalten insofern bemerkenswert ist, als schon von den älteren Beobachtern Ludwig und Leydig die Nährzellen mit der Eizelle auf den gleichen Ursprung, nämlich auf eine Zelle zurückgeführt wurden. Das gleiche gilt für einen anderen Angehörigen der Hirudineen, Branchellion, für welchen neuerdings durch Pérez festgestellt wurde, daß eine bestimmte Anzahl von Teilungen einer Oogonie zur Bildung des Eies und der zugehörigen Nährzellen führen. Nach Durchlaufen der Teilungen entsteht ein Komplex von 1 Eizelle + 2^n-1 Nährzellen. Aehnliches wird noch von anderen Tieren mitzuteilen sein.

Die anfängliche Gleichartigkeit von Ei- und Nährzellen ist auch bei den Crustaceen recht augenscheinlich, wie das Verhalten der Daphnoiden zeigt. Bei ihnen heben sich von dem endständigen Keimlager der Ovarialröhre regelmäßige Gruppen von vier Zellen ab, von denen immer die dritte das Ei liefert (Kühn, Weismann, Scharfenberg). Die vier Zellen waren anfangs ganz gleichartig (Fig. 49 Kgr) und über ihren gemeinsamen Ursprung kann kaum Zweifel bestehen und dies um so weniger, als im Bedarfsfall ganze Keimgruppen (bei Moina nicht weniger als 12) zur Ernährung des Eies verwendet werden, ausnahmsweise die zweite anstatt der dritten Zelle das Ei liefert und die Nährzellen außerdem einen Anlauf zur

Digitized by Google

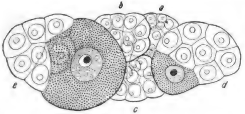


Fig. 48. Ovarium eines Anneliden (Tomopteris elegans) mit den Keimfächern a—e. Nach Chun.

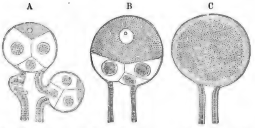


Fig. 50. Eifollikel mit den 3 Nährzellen von Apus cancriformis in verschiedenen Stadien der Ausbildung. Nach H. Ludwig.

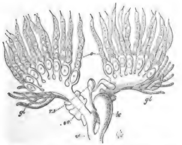


Fig. 51. Weiblicher Geschlechtsapparat eines Wasserkäfers (Hydrobius fuscipes), o Eiröhren, ov Ovidukt mit Drüsenanhängen, gl schlauchförmige Drüsen, rs Receptaculum seminis, v Vagina, bc Bursa copulatrix. Nach Stein aus R. Hertwigs Zoologie.

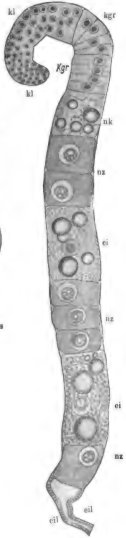


Fig. 49. Eierstock einer Daphnide (Sida crystallina), ei Oocyten, eil Eileiter, Kgr Keimgruppen, kl Keimlager, nk Nährkammer, nz Nährzellen. Nach A. Weismann.

Digitized by Google

Dotterbildung, ähnlich wie die Oocyten, nehmen können (**Weismann**). Man hat deshalb schon frühzeitig die Nährzellen

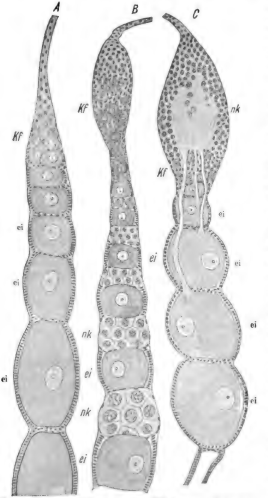


Fig. 52. Insekten-Eiröhren, A ohne Nährkammern (Orthopter), B mit mehrfachen Nährkammern (Coleopter), C mit endständiger Nährkammer und Nährsträngen an den Eiern (Hemipter), ei Eifächer, Kf Keimfach, nk Nährkammer.

der Daphnoiden als abortive Eizellen angesprochen (**Weismann, Claus**).

Ganz entsprechend liegen die Verhältnisse offenbar bei **Apus**, bei welchem Phyllopoden immer vier Zellen zu einem kugligen Follikel über die Oberfläche des dadurch traubig erscheinenden Ovariums vorgewölbt werden (Fig. 50 A), wobei die anfangs kleinere Oocyte eine distale Lagerung zeigt. Sie zeichnet sich bald durch ihren Dottergehalt vor den anderen drei Zellen aus und wächst bedeutend heran, während die drei zuerst sehr umfangreichen Nährzellen zurückbleiben, um von der an Umfang immer mehr zunehmenden Oocyte größtenteils resorbiert zu werden und schließlich ganz zu verschwinden (Fig. 50 A bis C). Die Verwendung abortiver Eizellen zur Ernährung des Eies dürfte bei den Crustaceen sehr verbreitet sein und findet sich in ähnlicher, wenn auch zumeist nicht so regelmäßig verlaufender Weise auch bei anderen Phyllopoden. Bei **Limnadia** liefert von den vier in einem gemeinsamen Follikel liegenden und vermutlich durch Teilung auseinander entstandenen Zellen ebenfalls die distal gelegene die Eizelle; bei anderen wie bei **Branchipus** ist die Lagerung der Nährzellen unregelmäßiger und sie können hier geradezu in das Plasma der Eizelle hineingedrückt werden (**A. Brauer, Nowikoff, Zograf, Fries**). Nährzellen, die ihr Material an die heranwachsende Eizelle liefern und schließlich von ihr aufgebraucht werden, besitzen auch die Ostracoden (**Woltereck**). Die Beziehungen der Nährzellen zu den Oocyten haben sich in sehr erfreulicher Klarheit bei den Insekten feststellen lassen, in deren Ovarien die Nährzellen überhaupt eine große Rolle

Digitized by Google

spielen. Zwar sind sie nicht immer vorhanden, denn bei den Orthopteren (Geradflüglern) heben sich die Oocyten einzeln vom Keimlager ab, umgeben sich mit dem Follikelepithel und lagern sich dann in einer Reihe hintereinander, dadurch die langgestreckte Eiröhre bildend (Fig. 52 A). Solcher Eiröhren findet sich zumeist eine ganze Anzahl am Ovarium, als dessen Ausstülpungen sie erscheinen (Fig. 51). In ihnen liegen die Eier perlschnurartig angeordnet (Fig. 52 A und C), um nach Erlangung der genügenden Ausbildung das Follikelepithel zu durchbrechen und in den Eikelch, d. h. in den Anfang des Leitungsapparates gebracht zu werden.

In letzterer Hinsicht stimmen die Insekten ziemlich überein, jedoch nicht insofern, als bei der Sonderung vom Keimlager nicht alle Zellen Oocyten liefern, sondern eine beträchtliche Anzahl zu Nährzellen wird. Dies kann auf die Weise geschehen, daß die Umwandlung in dem am blinden Ende der Eiröhre gelegenen, oft recht umfangreichen, eine große Menge von Zellen enthaltenden Nährfach erfolgt, welches gleichzeitig das Keimlager beherbergt (Fig. 52 C). Die Masse der Nährzellen wird nun direkt zur Ernährung der heranwachsenden Oocyten verwendet oder wird ihnen durch stielartige Plasmastränge zugeführt, welche von der Oocyte, die sich infolge des Dazwischenschiebens anderer Eianlagen mehr vom Nährfach entfernte, zu diesem hinreichen (Fig. 52 C). Solche Eiröhren mit endständiger Nährkammer (telotrophe Eiröhren nach Groß) findet man besonders bei den Hemipteren (Rhynchoten, Schnabelkerfen) und in ähnlicher Weise bei einem Teil der Coleopteren (Käfer), während andere Coleopteren, sowie die Neuropteren (Netzflüglern), Dipteren (Fliegen), Lepidopteren (Schmetterlinge), Hymenopteren (Bienen, Wespen usw.) den dritten Typus der Eiröhren, nämlich solche mit mehrfachen Nährkammern (polytrophe Eiröhren nach Groß;) aufweisen (Fig. 52 B). In diesem Fall erfolgt im Zusammenhang mit der Differenzierung der Eizelle diejenige einer anscheinend immer bestimmten Anzahl von Nährzellen, die wie schon früher erwähnt, größer oder geringer ist und von nur einer (Chironomus, Forficula; Fig. 47) bis gegen 50 (Procrustes, Apis) schwanken kann. Für gewöhnlich sind die Nährzellen in ein besonderes Fach eingeschlossen, welches ebenso wie das Eifach von einem Follikelepithel umgeben ist, jedoch können sich die Epithelzellen zuweilen, wie z. B. bei Tipula (Fig. 52 a) dicht an das Ei heran drängen, wie es vorher für die Crustaceen angegeben wurde, und mit ihm in demselben Follikel eingeschlossen werden (Fig. 52 a). Ihr Zerfall erfolgt dann innerhalb des Eies und ihre Aufnahme durch dieses ist von selbst gegeben, während die Verbindung zwischen Ei und Nährfach sonst eine weniger einfache ist und die Substanzlieferung durch die Nährzellen oder die Resorption der letzteren auf kompliziertem Wege erfolgt. Auf diese Vorgänge, sowie auf die in neuerer Zeit von Will, Korschelt, Wielowjeski, Groß und manchen anderen Autoren behandelten und allgemein bedeutungsvoll gewordenen Beziehungen der Zellenelemente der Insektenovarien untereinander kann hier nicht mehr eingegangen werden, jedoch ist noch eines wichtigen Punktes, nämlich des genetischen Verhältnisses der Nährzellen zur Eizelle zu gedenken. Als ein Insekt mit besonders großer Zahl von Nährzellen wurde vorher die Honigbiene erwähnt; für sie ist deren Zusammengehörigkeit mit der Eizelle bestimmt angegeben worden, indem nach Paulcke durch Teilung einer Oogonie zwei Zellen entstehen, von denen die eine durch weitere Teilungen Nährzellen, die andere ebenfalls Nährzellen und die Oocyte liefert, wodurch diese und die ihr beigegebenen 48 Nährzellen zustande kommen.

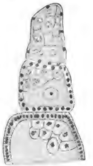


Fig. 52a. Längsschnitt durch das Vorderende einer Eiröhre von Tipula oleracea, oben noch nicht differenzierte Oocyten und Nährzellen, unten zwei Eifächer mit Nährzellen und umgebendem Follikelepithel. Nach Groß.

In völlig überzeugender Weise konnte der genetische Zusammenhang zwischen Ei- und Nährzellen durch die neuerdings von Debaisieux und Günthert bestätigten Untersuchungen Giardinas an Dytiscus festgestellt werden. Dieser Käfer besitzt in jedem Nährfach 15 Nährzellen, die auf folgende Weise entstehen. Eine Oogonie des Keimlagers erfährt dadurch eine eigentümliche Differenzierung ihres Kernes, daß beim Beginn der Kernteilung in dessen einer Hälfte sich die Chromosomen in der gewöhnlichen Weise ausbilden, in der anderen Hälfte jedoch eine eigentümliche netzartig strukturierte, später schaumige Masse entsteht (Fig. 53 A bis C), welche sich bei der Teilung ringförmig um die Spindel herum legt und dann nach deren einem Pol hin verschoben wird (Fig. 54 A bis C). Infolge dieser Lagerung des chromatischen Ringes fällt er nach Ablauf der Teilung vollständig an die eine

Digitized by Google

Tochterzelle, während die andere ganz frei davon ist (Fig. 55 A und B). Diese letztere teilt sich und liefert infolge wiederholter Teilung 8 Nährzellen, wie dies durch das Schema Fig. 56 und 57 A erläutert wird. Auch die mit der Chromatinmasse belastete Zelle geht in Teilung über (Fig. 55 B und C, Fig. 57 A) und zwar wiederholt sich der Vorgang in ähnlicher Weise, wie vorher geschildert dreimal, so wie das Schema Fig. 56 es angibt. Die Folge davon ist die Bildung von weiteren 7 Nährzellen und der wie ihre Stammzellen durch den Besitz der Chromatinmasse ausgezeichneten Oocyte (Fig. 53 bis

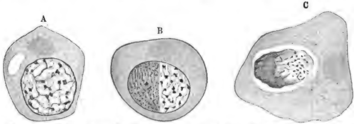


Fig. 53. A—C Differenzierung der Oogonie von Dytiscus beim Uebergang in die Differentialmitose. Nach Giardina aus Boveri 1904.

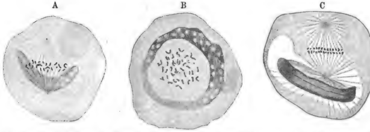


Fig. 54. A—C Teilung der Oogonie (Differentialmitose) von Dytiscus. Nach Giardina aus Boveri 1904.

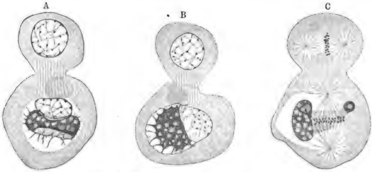


Fig. 55. A u. B Fortsetzung der Oogonienteilung von Dytiscus, C Teilung der Stammnährzelle (oben) und Fortsetzung der Oogonienteilung zur Lieferung der Oocyte und weiterer Nährzellen. Nach Giardina und Boveri 1904.

57). Letztere bildet mit ihren Nährzellen eine rosettenförmige Gruppe, woraus schließlich durch Umlagerung mit dem Follikelepithel je eine Ei- und Nährkammer

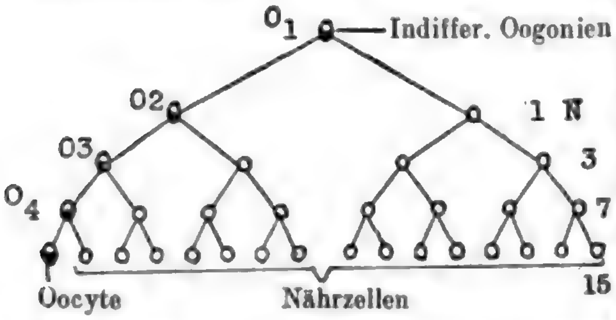


Fig. 56. Schema der Oogonienteilung (Differentialmitose) zur Bildung der Oocyte und Nährzellen bei Dytiscus und Colymbetes. O_1—O_4 die Reihenfolge der Oogonien bis zur Oocyte, N die Nährzellen. Nach Giardina und Günthert.

wird (Fig. 52 B). Diese ordnen sich in regelmäßiger Weise hintereinander an und indem sie, besonders aber die Oocyten, an Größe stetig zunehmen, entsteht daraus

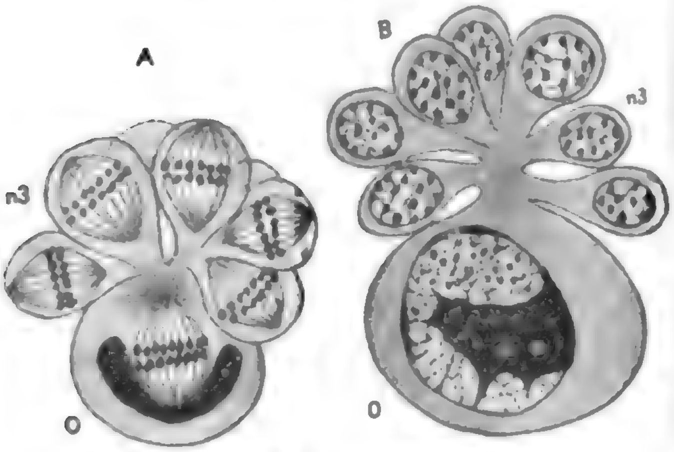


Fig. 57. A Teilung der Oogonie (unten mit Chromatinring) und Nährzellen zur Lieferung der Oocyte und definitiven Nährzellen (B), Rosettenbildung; o Oogonie bezw. Oocyte, nz Nährzellen. Nach Günthert.

die uns bekannte Form der perlschnurartig gestalteten Eiröhre (Fig. 52 B).

Auf die Verhältnisse bei Dytiscus und Colymbetes wurde deshalb etwas näher eingegangen, weil durch sie die Zusammengehörigkeit von Oocyten und Nährzellen infolge des Nachweises ihrer Abstammung mit Sicherheit erwiesen wird. Daß man es in diesen Fällen mit umgewandelten Keimzellen zu tun hat, kann keinem Zweifel unterliegen. Bezüglich der bemerkenswerten Schlüsse, welche in cytologischer Hinsicht aus dem charakteristischen Verhalten dieser Zellen gezogen werden, sei auf die Originalarbeiten von Giardina, Debaisieux und Günthert, sowie auf die darauf bezüglichen Ausführungen Boveris in seiner Schrift über die Konstitution der chromatischen Substanz des Zellkerns verwiesen.

3c) Dotterstöcke. Die massenhafte Ansammlung von Nährzellen am blinden Ende eines Ovarialschlauches zur Bildung eines umfangreichen Nährfachs, von welchem aus die Nährsubstanz dem Ei zugeführt wird, erinnert bereits an die bei manchen Tieren in Verbindung mit den Ovarien ausgebildeten Dotterstöcke, deren Zellenmaterial ebenfalls direkt oder indirekt zur Ausgestaltung der Eier verwendet wird. Der Dotterstock kann zuerst mit dem Eierstock ein gemeinsames Ganze bilden, wie es z. B. bei den Rädertieren zu beobachten ist (Fig. 58 a), was für einen

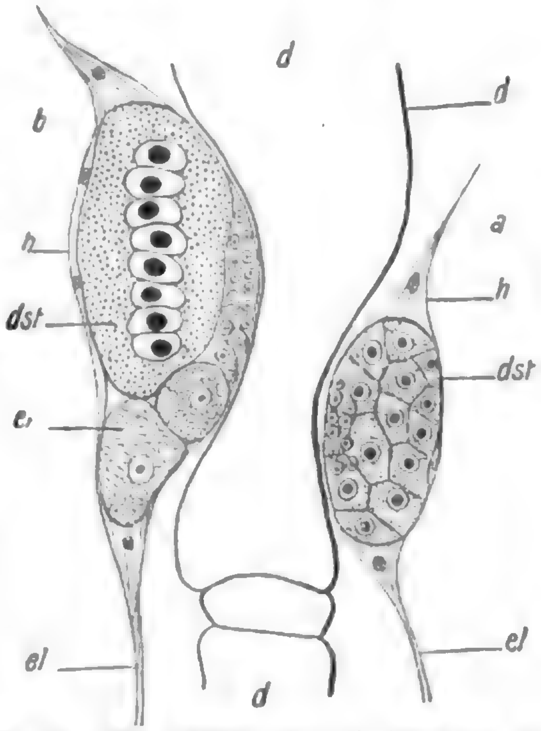


Fig. 58. Die weiblichen Geschlechtsorgane eines Rädertiers (Callidina symbiotica); a weniger, b weiter ausgebildeter Keimdotterstock, d Darmkanal, dst Dotterstock, ei heranwachsende Oocyten, el Eileiter, h bindegewebige Hülle. Nach Zelinka.

gleichartigen Ursprung der Ei- und Nährzellen spricht. Diese differenzieren sich späterhin zu einem gesonderten, meist aus einer bestimmten Anzahl von Zellen bestehenden Gebilde, eben dem Dotterstock (Fig. 58 b). Seine mit großem chromatinreichen Kern versehene Zellen sezernieren die für die Ernährung der Eier bestimmten Substanzen.

Derartige Einrichtungen für die Ausbildung der Eier werden besonders bei den Plathelminthen zu einer sehr vollkommenen Ausbildung gebracht. In Hinsicht auf die Entstehung der Dotterstöcke und die Herkunft ihrer Zellen erscheint es von Interesse, daß

Digitized by Google

ähnlich wie bei den Rädertieren nicht alle Plattwürmer mit Dotterstöcken ausgerüstet sind. So kennt man Turbellarien, welche einfach schlauchförmige Ovarien besitzen und bei denen von einem Dotterstock nicht die Rede ist (Fig. 59 A). Dagegen können bei ihnen im Ovarium kleine „abortive Keimzellen" vorhanden sein, welche als Nährzellen für die Eier funktionieren. Dieses Verhalten läßt sich als Uebergang zur Ausbildung eines Dotterstocks auffassen, denn die einfachste Form der Dotterstöcke bei den Turbellarien besteht darin, daß ein Zellenkomplex des Ovariums sich als ernährende Partie sondert, ohne von der keimbereitenden Region, dem eigentlichen Ovarium, scharf getrennt zu sein. Aehnlich wie bei den Rädertieren kann man dann von einem „Keimdotterstock" sprechen (Fig. 59 B). Allmählich wird der ernährende von dem keimerzeugenden Abschnitt schärfer getrennt und erscheint dann zunächst wie dieser als ein mit ihm gemeinsam ausmündendes Organ (Fig. 59 C). Durch Ausbuchtung und immer weiter gehende Verzweigung erlangen die Dotterstöcke schließlich die mächtige Ausbildung, wie man sie bei vielen Turbellarien Trematoden und Cestoden findet, bei denen sie sich als stark verzweigte Organe durch einen beträchtlichen Teil des Körpers erstrecken. Für ihre Auffassung wichtig ist es, daß diese drüsenartigen Organe auch dann nicht ein eigentliches Sekret absondern, vielmehr Zellen abzugeben pflegen, die sogenannten Dotterzellen, welche zusammen mit einer oder mehreren Eizellen in Kapseln eingeschlossen und je nachdem als Eier oder Kokons bezeichnet werden (Fig. 28). Besonders erwähnenswert ist dabei, daß von den zu mehreren in einer Kapsel enthaltenen Eiern unter Umständen nur einige oder nur eines zur Entwickelung gelangt, während die anderen schon früher zugrunde gehen und ähnlich wie die auch hier als „abortive Eizellen" zu betrachtenden Dotterzellen mit zur Ernährung der in Entwickelung begriffenen Embryonen verwendet werden, wovon schon vorher bei Besprechung der Kokons die Rede war.

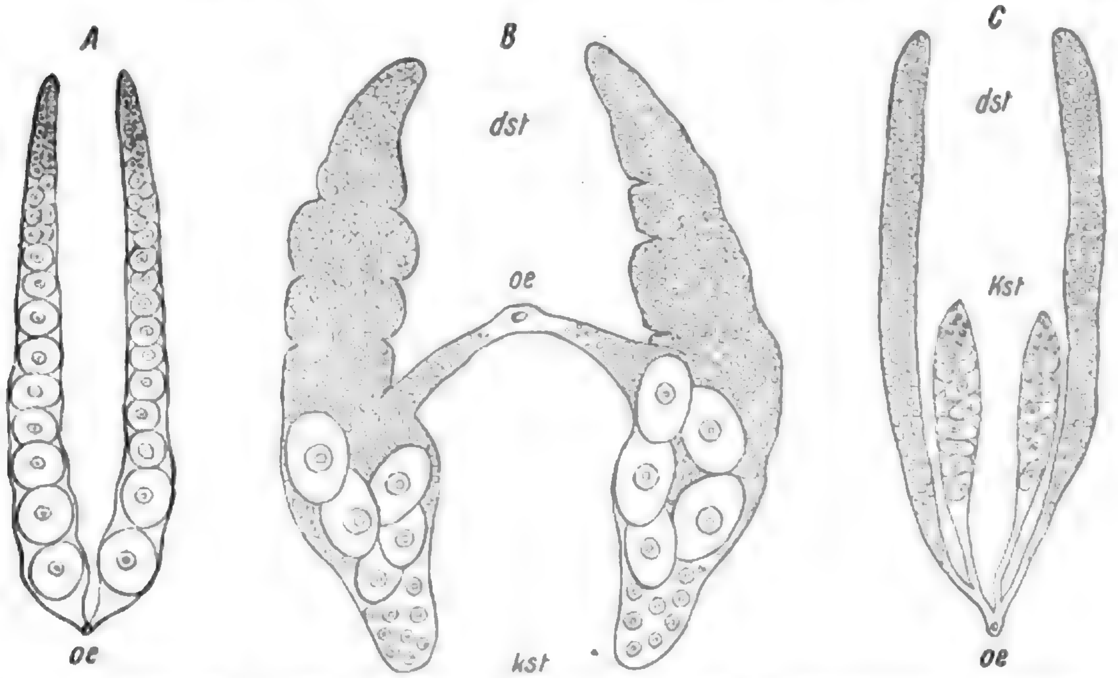


Fig. 59. Die weiblichen Geschlechtsorgane einiger Turbellarien, A Aphanostoma diversicolor, B Cylindrostoma quadrioculatum, C Provortex balticus; dst Dotterstock, Kst Keimstock (Ovarium), oe Geschlechtsöffnung. Nach L. v. Graff.

Literatur. *Aus der äußerst umfangreichen Literatur wird nur eine knappe Auswahl der hauptsächlich in Betracht kommenden oder besonders erwähnten Arbeiten gegeben. Ausführliche Darstellungen und Literaturverzeichnisse finden sich in den angeführten Arbeiten von* **Ludwig, Korschelt, Wilson und Waldeyer.** — **E. G. Balbiani,** *Centrosome und „Dotterkern". Arch. Anat. Phys., T. 29, 1893.* — **Ch. van Bambeke,** *Recherches sur l'oocyte de Pholcus phalangoides. Arch. Biol., t. 15, 1897.* — **F. de Beauchamp,** *Parthénogénèse chez Dinophilus. Compt. rend. Acad. Paris, T. 150, 1910.* — **E. van Beneden,** *Recherches sur la composition et la signification de l'oeuf. Mém. Acad. Roy. Belg., 2. sér., T. 29, 1870.* — **W. Bergmann,** *Eibildung bei Anneliden und Cephalopoden. Zeitschr. f. wiss. Zool. Bd. 73, 1902.* — **W. Berndt,** *Biologie und Anatomie von Alcippe lampas. Zeitschr. f. wiss. Zool., Bd. 74, 1903.* — **Derselbe,** *Studien an bohrenden Cirripedien. Arch. f. Biontologie, Bd. 1, 1906.* — **Th. Boveri,** *Die Polarität von Oocyte, Ei und Larve des Strongylocentrotus*

Digitized by Google

lividus. *Zool. Jahrb., Abt. f. Anat., 14. Bd., 1901.* — **Derselbe,** *Ergebnisse über die Konstitution der chromatischen Substanz des Zellkerns. Jena 1904.* — **A. Brauer,** *Das Ei von Branchipus Grubei von der Bildung bis zur Ablage. Abhandl. Akad. Berlin 1892.* — **F. Buchner,** *Die Schicksale des Keimplasmas der Sagitten in Reifung, Befruchtung, Keimbahn, Ovogenese und Spermatogenese. Festschrift f. R. Hertwig, 1. Bd. 1910.* — **K. Chun,** *Die pelagische Tierwelt in größeren Meerestiefen. Bibliotheka zoologica, 1, 1888.* — **C. Claus,** *Zur Kenntnis der Organisation und des feineren Baues der Cladoceren. Zeitschr. f. wiss. Zool., 27. Bd., 1876.* — **F. Doflein,** *Die Eibildung bei Tubularia. Zeitschr. f. wiss. Zool., 62. Bd., 1896.* — **E. G. Conklin,** *Sex differentiation in Dinophilus. Science, (2) Vol. 24, 1906.* — **P. Debaisieux,** *Les débuts de l'ovogénèse dans le Dytiscus marginalis. La Cellule, T. 25, 1909.* — **H. Driesch,** *Beobachtungen über die Organisation des Eies und ihre Genese. Arch. f. Entw. mech., 4. Bd., 1896.* — **Derselbe,** *Die organischen Regulationen. Leipzig 1901.* — **C. Dons,** *Entwickelung des Eies von Tomopteris usw. Arch. f. Zellforschung, 2. Bd., 1909.* — **W. Elpatiewsky,** *Die Urgeschlechtszellen bei Sagitta. Anat. Anz., 35. Bd., 1909.* — **W. Fries,** *Die Entwickelung der Chromosomen im Ei von Branchipus usw. Arch. f. Zellforschung. 4. Bd., 1909.* — **J. H. Fullarton,** *On the germinative organs and products of Tomopteris. Zool. Jahrb., Abt. Anat., 8. Bd., 1895.* — **A. Giardina,** *Origine dell' oocyte e delle cellule nutrici nel Dytiscus. Internat. Monatschr. f. Anat. u. Physiol., 18. Bd., 1901.* — **L. v. Graff,** *Rhabdocele Turbellarien. Leipzig 1882.* — **J. Gross,** *Untersuchungen über die Histologie des Insektenovariums. Zool. Jahrb., Anat. Abt., 18. Bd., 1903.* — **A. Gruvel,** *Revision des Cirrhipèdes. Nouv. Arch. Mus. Hist. Nat., 4. sér., T. 6, 1904.* — **A. Gurwitsch,** *Idiozom und Centralkörper im Ovarialei der Säugetiere. Arch. f. mikr. Anat., 56. Bd., 1900.* — **Derselbe,** *Morphologie und Biologie der Zelle. Jena 1904.* — **Th. Günthert,** *Die Eibildung der Dytisciden. Zool. Jahrb., Abt. f. Anat., 30. Bd., 1910.* — **V. Haecker,** *Die Eibildung bei Cyclops u. Canthocamptus. Zool. Jahrb., Abt. f. Anat., 5. Bd., 1892.* — **Derselbe,** *Das Keimbläschen, seine Elemente, und Lageveränderungen. Arch. f. mikr. Anat., 41. Bd., 1893.* — **Derselbe,** *Praxis und Theorie der Zellen und Befruchtungslehre. Jena 1899.* — **V. Haecker,** *Die Keimbahn von Cyclops. Arch. f. mikr. Anat., Vol. 49, 1897.* — **M. Hasper,** *Zur Entwickelung der Geschlechtsorgane von Chironomus. Zool. Jahrb., Abt. f. Anat., 31. Bd., 1911.* — **R. W. Hegner,** *Origin and early history of the germ cells of Chrysomelid Beetles. Journ. Morph., Vol. 20, 1909.* — **M. Heidenhain,** *Plasma und Zelle. Jena 1907—1911.* — **O. Hertwig,** *Beiträge zur Kenntnis der Bildung, Befruchtung und Teilung des tierischen Eies. Morph. Jahrb., 3. Bd., 1877.* — **Derselbe,** *Allgemeine Biologie. Jena 1906.* — **R. Hertwig,** *Eireifung und Befruchtung. O. Hertwigs Handbuch Vergl. u. Exp. Entwicklungsgesch., 1. Bd., 1906.* — **M. Jörgensen,** *Zur Entwickelungsgeschichte des Eierstockeies von Proteus anguineus. Festschr. f. R. Hertwig, 1. Bd. Jena 1910.* — **Derselbe,** *Untersuchungen über die Eibildung von Nephelis vulgaris. Arch. f. Zellforschung, 2. Bd., 1909.* — **Derselbe,** *Zur Kenntnis der Eibildung, Reifung usw. bei Schwämmen. Ebenda, 4. Bd., 1910.* — **W. Kahle,** *Die Pädogenese der Cecidomyen. Zoologica, 21. Bd., 1908.* — **M. Kollmann,** *Remarques sur quelques Rhizocéphales (Lernaeodiscus). Ann. Sc. Nat. (9) Zool., t. 10, 1909.* — **E. Korschelt,** *Bau und Entwickelung des Dinophilus apatris. Zeitschr. f. wiss. Zool., 37. Bd., 1882.* — **Derselbe,** *Entstehung und Bedeutung der verschiedenen Zellenelemente des Insektenovariums. Zeitschr. f. wiss. Zool., 43. Bd., 1886.* — **Derselbe,** *Bedeutung der Eihüllen, Mikrophylen usw. bei den Insekten. Nova Acta Leop. Carol., 51. Bd., 1887.* — **Derselbe,** *Beiträge zur Anatomie und Physiologie des Zellkernes. Zool. Jahrb., Abt. f. Anat., 3. Bd., 1889.* — **Derselbe,** *Ophryotrocha puerilis. Zeitschr. f. wiss. Zool., 57. u. 60. Bd., 1893 u. 1895.* — **E. Korschelt und K. Heider,** *Lehrb. Vgl. Entwickelungsgeschichte. Allg. Teil. Ei, Eibildung, Eireifung usw. Jena 1902.* — **A. Kossel,** *Nucleinstoffe. Liebreichs Encyclopädie, 3. Bd., 1898.* — **A. Kühn,** *Die Entwickelung der Keimzellen in den parthenogenetischen Generationen der Cladoceren. Arch. f. Zellforschung, 1. Bd., 1908.* — **R. Leuckart,** *Mikropyle und feinerer Bau der Schalenhaut bei Insekten. Arch. f. Anat. Phys., 1855.* — **F. Leydig,** *Eierstock und Samentasche bei den Insekten. Nova Acta Leopold. Anat., 33. Bd., 1867.* — **H. Ludwig,** *Die Eibildung im Tierreich. Arb. d. Zool. Inst. Würzburg, 1. Bd., 1874.* — **H. Lams,** *Recherches sur l'oeuf d'Arion empiricorum. Mém. Acad. Belg., 2. sér., T. 2, 1910.* — **H. Lams,** *Contribution à l'étude de la genèse du vitellus dans l'ovules des Teléostiens. Arch. Anat. Micr., T. 6, 1904.* — **Derselbe,** *Genèse du vitellus dans l'ovule des Amphibiens. Ebenda, T. 9, 1907.* — **H. v. Malsen,** *Geschlechtsbestimmende Einflüsse und Eibildung des Dinophilus apatris. Arch. f. mikr. Anat. 69. Bd., 1906.* — **M. Maupas,** *Multiplication, fécondation et détermination de la sexualité chez l'Hydatina senta. Compt. rend. Acad. Paris, t. 111 u. 113, 1890 u. 91.* — **J. F. Mc Clendon,** *Myzostomes of the Albatross Expedition to Japan. Bull. Americ. Museum Nat. History. Vol. 22, 1906.* — **Th. Montgomery,** *Comp. cytolog. studies usw. Morphology of the nucleolus. Journ. Morph., Vol. XV, 1899.* — **Th. Moroff,** *Oogonetische Studien (Copepoden) I. Arch. f. Zellforschung. 2. Bd., 1909.* — **J. A. Nelson,** *Early development of Dinophilus. Proc. Acad. Nat. Hist. Philadelphia 1904.* — **W. Noack,** *Beiträge zur Entwicklungsgeschichte der Musciden. Zeitschr. f. wiss. Zool., 70. Bd., 1901.* — **M. Nowikoff,** *Untersuchungen über den Bau der Limnadia tenticularis. Zeitschr. f. wiss. Zool., 78. Bd., 1905.* — **M. Nussbaum,** *Die Entstehung des Geschlechts bei Hydatina senta. Arch. f. mikr. Anat., 49. Bd., 1897.* — **P. Obst,** *Verhalten der Nucleolen bei der Eibildung einiger Mollusken und Arachnoiden. Zeitschr. f. wiss. Zool., 66. Bd., 1899.* — **Ch. Pérez,** *Notes histologiques sur le Branchellion de la Torpille. Trav. Stat. Biol. Arcachon, T. 10, 1908.* — **O. le Roi,** *Dendrogaster arborescen usw. Zeitschrift für wiss. Zool., 86. Bd., 1907.* — **Roux,** *Gesammelte Abhandlungen. Leipzig 1875.* — **Derselbe,** *Die Bestimmung*

Digitized by Google

der Medianebene beim Froschembryo usw. Arch. f. mikr. Anat., 29. Bd., 1887. — **Derselbe,** *Ueber die Selbstregulation der Lebewesen. Arch. f. Entw.-Mechanik, 13. Bd., 1902.* — **J. Rückert,** *Die erste Entwickelung des Eies der Elasmobranchier. Festschr. f. Kupffer. Jena 1899.* — **U. v. Scharfenberg,** *Studien und Experimente über die Eibildung und den Generationscyclus von Daphnia magna. Internat. Rev. Hydrobiol., 3. Bd., 1910.* — **J. Schaxel,** *Die Morphologie des Eiwachstums und die Follikelbildung bei den Ascidien. Arch. f. Zellforschung, 4. Bd., 1910.* — **Derselbe,** *Die Eibildung der Meduse Pelagia noctiluca. Festschr. f. R. Hertwig, 1. Bd. Jena 1910.* — **F. E. Schulze,** *Untersuchungen über den Bau und die Entwickelung der Spongien. Zeitschr. f. wiss. Zool., 25—35. Bd., 1875—1881.* — **A. F. Shull,** *Studies in the life cycle of Hydatina senta. Journ. Exp. Zool., Vol. 8, 1910.* — **F. Silvestri,** *Verschiedene Abhandlungen über parasitische Hymenopteren. Boll. Lab. Zool. Scuola Agricolt. Portici, Vol. 1 bis 3, 1907/08.* — **O. van der Stricht,** *La structure de l'oeuf des Mammifères. Arch. Biol., 21. Bd., 1904.* — **Derselbe,** *La couche vitellogène et les mitochondries de l'oeuf des Mammifères. Verhandl. Anat. Ges. (Anat. Anz.), 1904.* — **Derselbe,** *Structure de l'oeuf des Mammifères. III. Mém. Acad. Belg., 2. sér., T. 2, 1910.* — **H. v. Voss,** *Beitrag zur Kenntnis der Eireifung bei den Acanthocephalen. Arch. f. Zellforschung, 5. Bd., 1910.* — **W. Waldeyer,** *Eierstock und Ei. Leipzig 1870.* — **Derselbe,** *Die Geschlechtszellen. Handb. vgl. u. exp. Entw.-Gesch. von O. Hertwig, 1. Bd., 1903.* — **A. Weismann,** *Die Eibildung der Daphnoiden. Zeitschr. f. wiss. Zool., 27. u. 28. Bd., 1876 u. 1877.* **Derselbe,** *Die Entstehung der Sexualzellen bei den Hydroiden, Jena 1883.* — **D. D. Whitney,** *Determination of sex in Hydatina senta. Journ. Exp. Zool., Vol. 5, 1907.* — **H. v. Wielowieyski,** *Ueber den Bau der Insektenovarien. Krakau 1886, Zool. Anz., 8. u. 9. Bd., 1885 u. 1886.* — **Derselbe,** *Weitere Untersuchungen über die Morphologie und Entwickelungsgeschichte des Insektenovariums. Arb. d. Zool. Inst. Wien, 16. Bd., 1906 und Bull. Acad. Sc. Krakau 1908.* — **L. Will,** *Bildungsgeschichte und morpholog. Wert des Eies von Nepa und Notonecta. Zeitschr. f. wiss. Zool., 41. Bd., 1885.* — **Derselbe,** *Oogenetische Studien (Colymbetes). Ebenda, 43. Bd., 1886.* — **E. B. Wilson,** *The cell in development and inheritance. II. Aufl.. New York 1900.* — **R. Woltereck,** *Zur Bildung und Entwickelung des Ostracodeneies. Zeitschr. f. wiss. Zool., 64. Bd., 1898.* — **N. v. Zograf,** *Phyllopodenstudien. Zeitschr. f. wiss. Zool., 86. Bd., 1907.* — **C. Zelinka,** *Studien über Rädertiere. Zeitschr. f. wiss. Zoologie, 44. und 47. Bd., 1886 und 1888.*

E. Korschelt.

Eichler

August Wilhelm.

Er wurde am 22. April 1839 in Neukirchen (Kurhessen) geboren, studierte von 1857 bis 1860 in Marburg Mathematik und Naturwissenschaften und bestand im gleichen Jahre des Oberlehrerexamen. 1861 wurde er von Martius als Assistent an dessen Herbarium nach München berufen, wo er seine Pflanzenkenntnis erweiterte und bald an den Arbeiten zu der von M. herausgegebenen Flora brasiliensis teilnahm. 1865 habilitierte er sich an der dortigen Universität und übernahm 1868 nach Martius Tode selbst die Redaktion des genannten großen Werkes. Drei Jahre später folgte er einem Rufe als Professor und Direktor des Botanischen Gartens am Polytechnikum zu Graz, siedelte aber schon 1873 in gleicher Eigenschaft nach Kiel und 1878 als Nachfolger Al. Brauns nach Berlin über. Hier wurde er 1880 Mitglied der Akademie der Wissenschaften und starb am 2. März 1887. — Unter seinen Arbeiten, die die pflanzliche äußere Morphologie behandeln, sind seine Dissertation über die Entwickelung des Blattes und der Nebenblattbildungen (1861) und besonders sein Hauptwerk, die „Blütendiagramme" (2 Bände, Leipzig 1875 bis 1878) zu nennen, zu der er die Figuren selbst auf Holz zeichnete. An diese Arbeit schlossen sich eine große Zahl kleinerer Einzelstudien über Fragen der Blütenmorphologie. Außerdem hat er neben anderen systematischen Arbeiten eine große Reihe von Familien (z. B. Dilleniaceen, Cycadeen, Coniferen, Combretaceen, Lauraceen, Loranthaceen, Balanophoraceen usw.) für die Flora brasiliensis bearbeitet. In weitere Kreise ist sein „Syllabus der Vorlesungen über Phanerogamenkunde" (Kiel, 1876, 4. Auflage 1886) gedrungen, in welchem er ein natürliches System veröffentlichte.

Literatur. **K. Schumann** *in Berichte der Deutschen Botan. Gesellsch., Bd. V, 1887. S. XXXIII—XXXVII.*

W. Ruhland.

Eis.

1. Arten des Eises. 2. Physikalische Konstanten. 3. Verhalten unter Druck, Plastizität, Regelation. 4. Schneegrenze. 5. Firn. 6. Lawinen. 7. Gletscher (Inlandeis, Talgletscher, Vorland vergletscherung). 8. Verbreitung der Gletscher. 9. Bewegung der Gletscher. Temperatur der Gletscher. 10. Spalten. 11. Struktur (Schichtung, Bänderung, Gletscherkorn). 12. Theorie der Gletscherbewegung. 13. Eis und Fels (Frostverwitterung, Glazialerosion, Anordnung des Schuttes, Moränen und Schwemmkegel). 14. Ernährung und Aufzehrung der Gletscher (Niederschlagsmengen, Ablation, Gletscherbach, Eisberge). 15. Gletscherschwankungen.

Eis ist festes Wasser, das unter gewöhnlichem Druck nur bei Temperaturen unter 0° C besteht. Es kristallisiert hexagonal, ist also optisch einachsig und zeigt die entsprechenden Polarisationsbilder.

1. Arten des Eises. Wassereis. Wird ruhendes Wasser einem Abkühlungsprozeß unterworfen, so entstehen an der Abkühlungsfläche kleine Eisplättchen, welche sich zunächst zu Nadeln, später zu einer zusammenhängenden Eisdecke vereinigen, die senk-

Digitized by Google

recht zur Plättchenebene, also in der Richtung der optischen Achse, wächst, wenn die Abkühlung genügend lang anhält. Bei großen Wasserbecken (Teiche, Seen, Meere) ist die Oberfläche allein Abkühlungsfläche, daher in diesem Falle die optische Achse vertikal. Die sehr homogenen Eisdecken lassen schwer einzelne Kristalle erkennen; beim langsamen Schmelzen zerfallen Teile solcher Decken in stengelige Stücke. Wird in Gefäßen aus guten Wärmeleitern Eis gebildet, so wird auch die Gefäßwand zur Abkühlungsfläche; der entstehende Eisblock stellt ein Konglomerat von Eiskörnern dar, deren Achsen nur einen gewissen Grad von regelmäßiger Anordnung zeigen. Ist während des Gefrierprozesses der Wärmestrom unregelmäßig (Konvektionsbewegung, Fließen des Wassers usw.), so entsteht Körnereis mit wirr durcheinander liegenden Kristallachsen, wie beim Grundeis der Flüsse oder bei Eis, das während eines Schneefalles an die ins Wasser fallenden Schneekristalle anwächst. Das Zufrieren der Flüsse erfolgt derart, daß Grundeis an die längs der Ufer (im langsam bewegten Wasser) gebildeten Eisstreifen anwächst, also vom Rand gegen die Mitte. Nur bei lang andauernder Kälte und geringer Geschwindigkeit werden im Unterlauf großer Flüsse zusammenhängende Eisdecken von einem zum anderen Ufer entstehen. Bei Eintritt von Tauwetter bersten diese Decken und die Trümmer gehen als Scholleneis stromabwärts (Eisgang); dabei findet, wenn durch Schmelzwasser der Wasserspiegel steigt, ein Ueberschieben der Schollen über noch festsitzendes Eis statt, was zu Aufstauungen an Brückenpfeilern und zur Gefährdung der Brücken führen kann. Die größten Massen von Wassereis finden sich in den polaren Meeren, wo die jährlich neu entstehende Eisdecke 2 bis 8 m Dicke erreicht (Packeis).

Bodeneis. In den polaren Gebieten Sibiriens und Alaskas ist von einer gewissen Tiefe an der Boden dauernd gefroren — Bodeneis. Wo eine Schneedecke während eines Teils der Jahres den Boden gegen Ausstrahlung schützt, bildet sich Bodeneis erst bei einer mittleren Jahrestemperatur unter —5° C; wo die Schneedecke fehlt, kann dies schon bei höherer Mitteltemperatur eintreten. In den nördlichsten Teilen Zentralasiens schmilzt während der kurz dauernden Wärmeperiode des Jahres nur die alleroberste Schicht des in große Tiefen hinab reichenden Bodeneises, das in seiner Hauptmasse in der Vorzeit gebildet, für uns also fossiles Eis ist. Eingeschlossen von solchem Eisboden fand man in Sibirien vorzüglich erhaltene Exemplare des Mammut.

Höhleneis. In Eishöhlen haben die untersten am Boden aufsitzenden Lagen der Stalagmiten vertikale optische Achsen, die darüber liegenden in kugeligen Schalen angewachsenen Lagen radial verlaufende Achsen. Die Stalaktiten bilden sich um einen Kristall, dessen Oberfläche zur Abkühlungsfläche wurde und zeigen an den Seiten des Eiszapfens horizontale, am unteren Ende vertikale Achsenrichtungen, genau wie die Eiszapfen, welche an Dachtraufen usw. als Tropfeis entstehen.

Rauhfrost. Aus unterkühltem Wasser, das unter einer Decke von Sand, Moos usw. zum Erstarren kommt, bilden sich mitunter sehr lange sechsseitige Eissäulchen mit vertikaler Achse, die eng aneinander stehen: Rauhfrostkristalle, deren Kristallform mit freiem Auge zu erkennen ist.

Reif. An den durch Ausstrahlung oder starke Abkühlung unter den Gefrierpunkt erkalteten festen Körpern scheidet sich aus der Luft der Wasserdampf in Form kleiner Kristalle aus — Reif.

Schnee bildet sich in der Luft durch unmittelbaren Uebergang des gasförmigen Wasserdampfes in den festen Zustand, also durch Sublimation. Die Schneekristalle entstehen somit durch einen rasch wirkenden Kristallisationsprozeß; ist bei ihrer Bildung die Temperatur niedrig, so entstehen Plättchen von ziemlich regelmäßiger Ausbildung; bei Temperaturen nahe an 0° herrscht der sechsseitige Stern vor, der sich aus dem Plättchen entwickelt und vielfache Verzweigungen zeigen kann. In sehr feuchter Luft von nahe 0° vereinigen sich mehrere Einzelkristalle, zu unregelmäßigen Gruppen: der Schnee fällt in Flocken. Der Vorgang gleicht dem Ausscheiden von Salzkristallen aus einer Lösung, die während des Sinkens weiter wachsen. Bei sehr niederen Temperaturen fällt Körnerschnee, dem die Kristallform nicht mehr unmittelbar anzusehen ist. — Die anderen Formen des festen atmosphärischen Niederschlages, Graupeln und Hagel, lassen sich nicht immer scharf gegen „Schnee“ abgrenzen. Die Graupelkörner bestehen häufig aus einem Eiskern mit erkennbarer Kristallform, um den sich ein reifartiger Niederschlag gebildet hat. Andererseits zeigen sie strahlige Struktur, was darauf hindeutet, daß der aus unterkühltem Wasser momentan entstandene Eiskern beim Passieren verschieden temperierter Luftschichten Veränderungen durch Schmelzen und neues Ankristallisieren erfuhr.

Tyndallsche Schmelzfiguren. Ein Bündel Sonnenstrahlen, das auf Eis fällt, bringt in diesem durch Schmelzung kleine sechsseitige Figuren hervor, deren Ebenen senkrecht zur optischen Achse liegen; diese Figuren können zur Bestimmung der Richtungen der Nebenachsen verwendet werden. Sie gehören in die Gruppe der

Digitized by Google

„negativen" Kristalle (vgl. den Artikel „Aetzfiguren"), sind also Hohlräume in der Eismasse, die bei der Kristallbildung entweder eisfrei blieben oder von Eis mit etwas niedrigerem Schmelzpunkt (s. unten) ausgefüllt wurden.

Forelsche Streifen werden durch das Ausstreichen der Plättchen, aus denen sich größere Eiskristalle zusammensetzen, beim Schmelzen der Kristalle an deren Oberfläche gebildet. Die Streifen sind also immer senkrecht zur optischen Achse gerichtet.

2. Physikalische Konstanten des Eises. Spezifisches Gewicht 0,91674 (Bunsen). Ausdehnungskoeffizient 0,00013. Wärmeleitungsfähigkeit 0,0057 cal/sec. Durchlässigkeit für Wärmestrahlung etwa 6 %. Spezifische Wärme 0,46 bis 0,53 cal zwischen —39° und 0° C. Dielektrizitätskonstante bei —24° ist 78. Brechungsexponent für den ordentlichen Strahl 1,3091; Brechungsexponent für den außerordentlichen 1,3104. Elastizitätsmodul $2{,}76 . 10^{11}$ cm^{-1} g sec^{-2}. Druckfestigkeit ca. 25 kg/cm^2. Zugfestigkeit ca. 7,5 kg/cm^2. Die mechanischen Konstanten sind sowohl stark veränderlich mit der Temperatur, als auch sehr abhängig von der Art und Dauer der Krafteinwirkung.

3. Verhalten des Eises unter Druck. Da das Eis beim Schmelzen sein Volumen vermindert, so wirkt der auf Eis ausgeübte allseitige Druck im Sinne des Schmelzens. Die beim Drücken aufgewendete Arbeit hat also den Erfolg, daß ohne Wärmezufuhr ein Schmelzen des Eises bei niedrigerer als der gewöhnlichen Schmelztemperatur eintritt, daß der Schmelzpunkt sinkt (J. Thomson). Theorie und Beobachtung ergaben in hinreichender Uebereinstimmung, daß einer Druckänderung um 1 kg/cm^2 ein Sinken des Schmelzpunktes um 0,0073° C entspricht (dies gilt für allseitig wirkenden Druck; für einseitig wirkenden findet sich, nach E. Riecke, die Temperaturerniedrigung des Eises zu $0{,}00036\ p^2$ °C, wenn p den einseitigen Druck in kg/cm^2 bezeichnet). Bei Drucken über 2200 kg/cm^2 und Temperaturen unter —21,3° C besteht das gewöhnliche Eis nicht mehr; es können dann zwei Modifikationen mit verschiedenen Eigenschaften bestehen (G. Tammann 1902). Aus den Grundgleichungen der mechanischen Wärmetheorie folgt, daß bei einer Zustandsänderung, der ein Eis-Wassergemisch durch Druckänderung unterworfen wird, der flüssige Anteil der Gewichtseinheit dieses Gemisches gesetzmäßigen Aenderungen unterliegt, welche durch die Gleichung $\mu = -0{,}007\,t + 0{,}0004\,t^2$ gegeben sind, in welcher t die Temperatur in Celsiusgraden, μ den flüssigen Anteil pro Gewichtseinheit bedeutet. Wenn also auf ein solches Gemisch gedrückt wird, so entsteht neues Wasser, das beim Nachlassen des Druckes ganz oder teilweise gefriert. Wo in der Natur Eis in dickeren Lagen vorkommt, werden deren untere Schichten unter dem Druck der oberen stehen. Haben diese Eislagen die Schmelztemperatur, so müssen sich in den verschiedenen Tiefen auch die dem Druck entsprechenden Wassermengen finden. Auf dem Vorhandensein dieser Wassermengen beruht die Plastizität des Eises, das die Schmelztemperatur hat, die dem überlastenden Druck entspricht. Die kleinen Wassermengen wirken wie Schmiermittel zwischen den Eiskörnern, die ein Eisstück, oder zwischen den Plättchen, die ein Eiskorn zusammensetzen; sie vermindern die innere Reibung im Eis, das sich wie eine zähe Flüssigkeit verhält, in welcher auch der kleinste lang anhaltende Zwang mit der Zeit wachsende Formänderungen erzeugt. Eis von niedrigerer Temperatur hat eine ganz geringe Plastizität; so lange der auf ihm lastende Druck kleiner als der Schmelzdruck ist.

Es kann zurzeit noch nicht mit Sicherheit gesagt werden, ob auch diese geringe Plastizität auf teilweise Schmelzung unter Druck zurückgeführt werden darf. Sicher ist, daß das Eis, welches einzelne Körner untereinander verbindet, ebenso wie die die Elementarplättchen eines Kristalls verknüpfenden Eispartikelchen minimale Spuren von Salzen enthalten, welche den Körnern und den Plättchen fehlen. Dadurch erhalten diese Eisbrücken einen etwas tiefer liegenden Schmelzpunkt als das reine Eis. Die Tyndallschen Schmelzfiguren zeigen außerdem, daß sich die Plättchen eines Kristalls nicht vollkommen berühren. Es kann also sein, daß doch die wirklichen Berührungsstellen zusammen nur so groß sind, daß sich für einen Querschnitt der Schmelzdruck ergibt, wenn dieser auch scheinbar noch nicht erreicht ist. Es scheint demnach möglich, daß man auch die Plastizität bei niedrigeren Temperaturen und relativ kleinen Drucken, sowie die Translation in einem Eiskristall wenigstens teilweise auf die Bildung kleiner Schmelzwassermengen zurückführen darf.

Werden zwei auf Schmelztemperatur befindliche Eisstücke aneinander gepreßt, so tritt an der Berührungsstelle Schmelzpunktserniedrigung und teilweises Schmelzen ein. Beim Nachlassen des Druckes wird das entstandene Schmelzwasser wieder fest, die beiden Eisstücke haften aneinander — Regelation. Diese ist eine vollständige, wenn bei zwei regelierenden Eiskristallen sowohl Haupt- als Nebenachsen gleichgerichtet sind; dann vereinigen sich beide Kristalle zu einem Individuum. In allen anderen Fällen ist die Festigkeit an der Regelationsfläche geringer; diese Fläche wird dann, wegen der anderen optischen Eigenschaften des neugebildeten Eises, sichtbar.

Digitized by Google

4. Schneegrenze. Verbindet man alle Punkte der Erdoberfläche, welche zu bestimmter Zeit an der Grenze schneefreien und schneebedeckten Gebietes liegen, so erhält man die temporäre Schneegrenze. Ihre Lage ist mit der Jahreszeit wechselnd; im Winter ist sie tief, im Sommer hoch. In der Schweiz z. B. hat sie im Säntisgebiet als Tiefstlage etwa 720 m (März), als Höchstlage mehr als 2400 m (Juli bis August). Von einer gewissen Höhe an ist die Schneedecke dauernd: klimatische Schneegrenze. Diese ist definiert als die Verbindungslinie aller Punkte, in denen auf horizontaler, nicht beschatteter Fläche die Schneedecke während des Sommers eben noch zum Schmelzen gebracht werden kann. Mangel an horizontalen Flächen, Schneeverwehung durch Wind, Beschattung (orographische Begünstigung) verursachen, daß die klimatische Schneegrenze in der Natur nicht beobachtet werden kann. An ihrer Stelle sieht man die untere Grenze der Schneefleckenregion, die orographische Firngrenze, und die Höchstlage der temporären Schneegrenze. Zwischen beiden beobachtbaren Linien liegt die klimatische Schneegrenze.

Die Höhe der Schneegrenze hängt von der Menge des in fester Form fallenden Niederschlages und von der geographischen Breite ab (in der Schweiz fällt erst in 3600 m Höhe der ganze Jahresniederschlag in festem Zustand; für je 100 m Tiefe wächst der flüssige Teil um ca. 3 %). Mit zunehmender Entfernung von der Küste nimmt die Niederschlagsmenge ab, daher steigt die Schneegrenze, trotz gleichbleibender geographischer Breite, landeinwärts an (in Skandinavien bei 80 km Entfernung von der Küste, Schneegrenzhöhe 1100 bis 1300 m; bei 180 km Entfernung von der Küste, Schneegrenzhöhe 1900 m, in Alaska, am Mt. Elias 700 m, landeinwärts auf der Nordseite des Gebirges 2200 m Schneegrenzhöhe). In einzelnen Gebirgen sind die Randgebiete niederschlagsreicher, als die zentralen Teile, daher Ansteigen der Schneegrenze mit der Massenerhebung (Alpen). Die höchste Lage erreicht die Schneegrenze in den äquatorialen und kontinentalen Gebieten; in den Anden von Peru bei 24° s. Br. auf der Ostseite des Gebirges liegt sie 6000 bis 6200 m hoch, im Küenlüngebirge bis 6000 m, während sie in dem küstennäheren, südlicher gelegenen Himalaya nur bis 5600 m ansteigt. Gegen die Pole sinkt die Schneegrenzhöhe immer mehr; auf der Südhalbkugel am Rande der Antarktis erreicht sie das Meeresniveau schon in 68° s. B., während sie im Norden, bei 82° Br. auf Franz-Josefsland noch 50 m über dem Meere liegt; in Ostgrönland erreicht sie aber auch an einigen Stellen bei 79° n. B. das Meeresniveau.

5. Firn. Oberhalb der Schneegrenze sammelt sich der Schnee verschiedener Jahre an; er wird zeitweise der Sonnenstrahlung ausgesetzt und seine Oberfläche erhält dann infolge teilweisen Schmelzens und darauf folgenden Wiedergefrierens eine dünne Schicht körnigen Eises. Unter dieser findet sich unversehrt der feinkörnige trockene Hochschnee. Neu anfallende Niederschläge decken die umgeformte frühere Oberflächenschicht und erreichen eine gewisse Höhe über derselben. In der neuen Oberflächenschicht findet eine ähnliche Umwandlung statt, wie in der älteren, welche unter dem Druck ihrer Nachfolgerinnen immer weiter gehende Umkristallisationen durchmacht, so daß ihre Struktur immer grobkörniger wird. Der Schnee wird zum Firn, der eine dem Wechsel niederschlagsreicher und trockener Zeiten entsprechende Schichtung besitzt.

6. Lawinen. Schnee, der sich an steilen Hängen sammelt, muß beim Eintritt wärmerer Witterung auf seiner Unterlage abrutschen. Wegen der Regelation werden sich an kleine in Bewegung geratene Schneeballen immer mehr Massen ansetzen, bis schließlich die ganze Schneedecke als Grundlawine zu Tale geht, um an Stellen mit geringer Neigung abgelagert zu werden. Findet dies unterhalb der Schneegrenze statt, so schmilzt der Lawinenkegel im Laufe der Zeit weg; was aber über der Schneegrenze zur Ablagerung kommt, muß schon vorhandene Schnee- und Eisansammlungen vermehren, wird zum Nährmaterial von Gletschern. Staublawinen entstehen, wenn die obere, noch aus unverfirntem Schnee bestehende Schichte über eine hart gefrorene vereiste ältere Oberfläche der Schneedecke abrutschen kann. Begleiterscheinungen des Niedergehens von Lawinen sind starke Luftbewegungen (Windbruch von Bäumen), Zerstörung des Untergrundes, Regelation und daher festes Zusammenbacken der zur Ruhe kommenden Lawinenmasse, so daß mitgerissene Fremdkörper (Menschen) mit einem Ruck in einen allseitig fest anschließenden Eismantel eingehüllt werden.

7. Gletscher. Schnee und Firn, die sich auf völlig horizontaler Unterlage ansammeln, müssen unter Einwirkung ihres Gewichtes wegen der durch Druck veranlaßten Beweglichkeit der untersten Schichten allmählich auseinanderfließen, bis sie an den Rand der Hochfläche gelangen, über den sie, den Neigungsverhältnissen entsprechend, mit mehr oder minder großer Geschwindigkeit unter die Schneegrenze gelangen und dort flüssig werden. Zwischen diesem Extrem des Plateaugletschers und dem anderen der Lawinen liegen die überaus mannigfaltigen Gletscherformen, wie sie durch die verschiedenartigen Gestaltungen der Gebirgsoberflächen bedingt

Digitized by Google

werden. Wo eine ausgedehnte Hochfläche von schwach konvexer Form über die Schneegrenze aufragt, wird sie zum Sammelgebiet eines Inlandeises, das durch mehrere Rinnen am Rande der Hochfläche Eisströme in die Tiefe sendet, welche im Abschmelzgebiet der Vernichtung anheimfallen (Fjelde in Norwegen, Inlandeis auf Grönland und der Antarktis). In Gebirgen, welche wie die Alpen eine reiche Zertalung besitzen, ragen eine Anzahl von Gipfeln mit den sie verbindenden Graten weit über ihre nächste Umgebung empor. In dieser bestehen muldenförmige, von den Graten umgrenzte Becken, also konkave Oberflächenformen, welche nur nach einer Seite offen sind und dorthin den in sie fallenden Niederschlägen Abschluß gewähren. Liegen diese Mulden über der Schneegrenze, so werden sie zum Sammelgebiet von Talgletschern, die sich mit ihrer Zunge weit unter die Schneegrenze erstrecken können. Häufig sind die Sammelbecken durch steilwandige Felsrücken in mehrere Teilbecken zerlegt, deren jedes einen Gletscher entsendet. Diese Teilgletscher setzen sich zu einem großen Talgletscher zusammen (z. B. Mer de Glace, Gornergletscher, Aletschgletscher, Pasterze usw. in den Alpen). Wenn auf dem flachen Boden des Gebirgsvorlandes die Zungen benachbarter Talgletscher zusammenfließen und sich zu einem breiten Eiskuchen ausdehnen können, spricht man von Vorlandvergletscherung, welche zuerst in Alaska am Malaspinagletscher beobachtet wurde. Sie ist auch von anderen Gletschern Alaskas, von einigen Gletschern Patagoniens, von antarktischen Inseln und dem Rande des südpolaren Kontinents bekannt geworden. Es gibt in der Antarktis und in Grönland noch Eisfußgletscher, die auf der Grenze zwischen Land und Meer liegen und aus geschichtetem Eis bestehen, das durch Lawinen, Wind und Niederschläge an Ort und Stelle gebildet erscheint. Diese Art von Gletschern steht wohl den Vorlandgletschern sehr nahe.

Wenn ein Gletscher ins Meer, oder in einen See endigt, so wird seine Zerstörung teilweise durch Abbruch größerer Eismassen (Kalben von Eisbergen) bewirkt.

Die Lage des Gletscherendes ist für die einzelnen Gletscher von deren Größe und Neigung und auch, wie für ganze Gletschergebiete, vom Klima abhängig. Die größten Gletscher senden ihre Zungen weit ins Tal hinaus, so daß sie unter die Baumgrenze herabsteigen. In einzelnen Fällen gedeiht auf den den Gletscher bedeckenden Schuttmassen eine üppige Vegetation, z. B. am Malaspinagletscher in Alaska tragen diese Schuttdecken Wälder, deren Bäume mehr als 100 Jahre alt sind.

Die Grenze zwischen Sammel- und Abschmelzgebiet, die Firngrenze, fällt annähernd mit der Höhenlage zusammen, welche die Schneegrenze auf Eisunterlage erreicht; sie ist also wie diese keine scharf erkennbare Linie in der Natur und sowohl von Jahr zu Jahr, als auch von Ort zu Ort beträchtlichen Höhenschwankungen unterworfen. Um ein annähernd richtiges Verhältnis zwischen den Flächen von Nähr- und Zehrgebiet eines Gletschers zu finden, hat man die Firngrenze nach besonderen Regeln aus gutem Kartenmaterial, wie es für die Alpenländer vorliegt, ermittelt, oder man hat ein bestimmtes Verhältnis dieser Flächengebiete (1:3) angenommen und daraus die Höhenlage der Firngrenze, also auch der Schneegrenze ermittelt. Diesem Teilungsverhältnis (1:3) kommt nur die Bedeutung eines statistischen Mittelwertes aus vielen, voneinander stark abweichenden Einzelwerten zu. Trotzdem hat das Resultat über das Ansteigen der Schneegrenze innerhalb eines Gebirges wohl allgemeine Gültigkeit; es ist bis jetzt auf diesem Weg für Alpen und Kaukasus gefunden.

8. Verbreitung der Gletscher. Die Gesamtvergletscherung der Erde umfaßt etwa 15,2 Millionen qkm, d. i. ca. 3 % der ganzen Erdoberfläche. Davon fallen auf die Hochgebirge der gemäßigten Zone nur ca. 110000 qkm, d. h. etwa 0,7 %.

(Tabelle siehe nebenstehend.)

In ähnlichem Verhältnis, wie die Flächen der einzelnen Gletschergebiete, stehen auch die Größen der Einzelgletscher. Der große Aletschgletscher in den Alpen z. B. umfaßt 115 qkm und ist 26,8 km lang, der Bezingigletscher im Kaukasus hat bei 14,7 km Länge 63,8 qkm Fläche. Im Karakorum Himalaya sind Gletscher von mehr als 60 km Länge, welche jeder für sich etwa 800 qkm bedecken. Sie zeichnen sich durch starke Schuttbedeckung ihrer Enden und dadurch aus, daß sie in tiefe, steilwandig umrahmte Täler eingebettet liegen. Viel größer ist der Malaspinagletscher in Alaska, dessen halbkreisförmig abgegrenzte Zunge fast 5000 qkm umfaßt und der Gletscher im Beardmore Outlet, den Shackleton auf seiner Wanderung zum Südpol passierte, hat bei mehr als 2000 km Länge eine Fläche von mindestens 30000 qkm.

9. Bewegung des Gletschers. Das Gletschereis ist beständig in Bewegung; die Besonderheiten dieser Bewegung sind die gleichen, wie die von Wasser in Flußläufen: die Geschwindigkeit ist in der Gletscherachse größer, als am Rand, sie wächst mit der Neigung des Gletscherbettes und ist unter sonst gleichen Bedingungen für große Gletscher beträchtlicher als für kleine. Für die

Digitized by Google

	Geographische Breite	Eisbedeckte Fläche qkm	Schneegrenze Höhe in m	Tiefstes Gletscherende m
Europa				
Alpen	45—47°N	>3 800	2400—3200	1100
Pyrenäen	42—43°	40	2600—2900	2200
Sierra Nevada	37°	—	3560	—
Aetna	37°30′	—	2900	—
Kaukasus	41—43°	>1 840	2900—3800	1620
Skandinavien	60—71°	5 000	750—1900	0
Island und Jan Mayen	65°	13 600	700—900	60(0)
Asien				
Zentralasien	27—36°N	20 000?	4800—6000	2900
Nord- und Ostasien	48—56°	2 000?	1600—3200	?
Amerika				
Alaska	58—62°N	60 000 (Alaska und Küstengebirge)	700—2200	0
Küstengebirge	40—58°N		1700—2200	0
Felsengebirge	43—51°	200?	3000—4000	1460
High Sierra (Kal.)	35°N	—	3900	—
Zentralamerika	19°N	—	4900	—
Anden von Südamerika	11°N	100 00(?)	4600—4700	—
	2—8°S		4700—4800	—
	16—21°S		5300—5400	—
	24°S		6200	
	25—30°S		4400—4750 i. E.	
			6600 i. W.	
	34°		3100—4500	
	41°		1500—1700	
	50°		1450	
	51°		800	
	53°		500—900	
Afrika				
Atlas	32°N	—	3300	—
Kibo, Kenia	0—10°	20(?)	4500—5200	4000
Australien				
Neuseeland	40—50°S	>1 000	2000—2400	200
Polarländer				
Grönland	60—83°	1 900 000	0—1300	0
Spitzbergen, Franzjosefsland, Nowaja Semlia	70—80°	88 000	300—400	0
Nordam. Inseln	65—80°	>100 000	100	0
Südseeinseln	50—70°	3 000	400	0
Antarktis	67—90°	13 000 000	0	0

größeren Alpengletscher z. B. liegt sie zwischen 30 und 150 m/Jahr; bei Gletschern des Himalaya wurden mehr als 700 m/Jahr gemessen, während einzelne Abflüsse des grönländischen Inlandeises Verschiebungen von 1000 bis 7000 m/Jahr erfahren.

Der Uebergang von der Randgeschwindigkeit zur maximalen Achsengeschwindigkeit ist stetig; die Zunahme ist am Rand groß, gegen die Mitte klein; bei breiten Gletschern ist der mittlere Teil eines Querschnittes beinahe gleich rasch bewegt; in den Außenteilen (je $^1/_4$ bis $^1/_5$ der Breite) findet die Abnahme auf etwa $^1/_8$ bis $^1/_{10}$ der Maximalgeschwindigkeit statt.

Diese Art der Geschwindigkeitsänderung in einem Querprofil (an der Oberfläche) bleibt dieselbe, wenn auch ein Gletscher aus mehreren Zuflüssen besteht; an den durch die Längsmoränen (vgl. unten) gekennzeichneten Verschmelzungsstellen zeigen sich keine sprungweisen Aenderungen der Geschwindigkeit.

Die Kurve, welche die Oberflächengeschwindigkeit für einen Querschnitt angibt, zeigt fast bei allen beobachteten Gletschern in der Nähe des Randes zwei Wendepunkte. Für den Hintereisferner liegen diese Punkte so, daß sie Stellen starker Tiefenzunahme des Gletschers entsprechen.

Es ist zu vermuten, daß ähnlich wie die Geschwindigkeit gegen den Rand abnimmt, sie sich auch in der Richtung der Tiefe ändert. Wenn für das abwärts von einem zu untersuchenden Querschnitt gelegene Gletschergebiet an möglichst vielen Stellen die Oberflächengeschwindigkeit und der Betrag der jährlichen Eisabschmelzung bekannt sind, so läßt sich die Tiefe jenes Querschnittes an einzelnen Stellen ermitteln,

Digitized by Google

unter der Voraussetzung, daß für alle senkrecht untereinander liegenden Eisteilchen dieselbe Geschwindigkeit gelte, wie für die oberste. Solche Beobachtungen und Profilrekonstruktionen wurden für den Hintereisgletscher (Oetztaler Alpen) ausgeführt. Später angestellte Tiefbohrungen führten zu dem Ergebnis, daß die mittlere Querschnittsgeschwindigkeit etwa 0,6 der Oberflächengeschwindigkeit beträgt. Bei den Tiefbohrungen zeigte sich auch, daß wahrscheinlich bis in große Tiefe hinab fast die gleiche Geschwindigkeit wie für die Oberfläche gilt. Daraus folgt, daß die Abnahme der Geschwindigkeit nach der Tiefe einem ähnlichen Gesetz folgt, wie die von der Mitte gegen den Rand.

Die Tiefbohrungen ergaben außerdem, daß die Stellen starker Neigungsänderung im Querschnitt genau da liegen, wo sie nach den Konstruktionen auf Grund der Geschwindigkeits- und Abtragsmessungen liegen müssen. Dies ist eine wesentliche Stütze für die Meinung, daß ein Gletscher an ständiger Vertiefung seines Bettes arbeitet (vgl. unten Abschnitt 13).

Im Längsprofil nimmt die Geschwindigkeit von den obersten Punkten des Firnes zu bis zu einer Stelle, die dem Uebergang aus dem Sammelbecken in das engere Abflußtal nahe liegt. Bis dahin wächst die Dicke der Eisschichte wegen des Zusammenschubes von den Seiten her und wegen der Vermehrung des Materiales durch Auftrag von Schnee. Von dieser Stelle an bis zum Gletscherende nimmt die Geschwindigkeit, den wechselnden Neigungsverhältnissen entsprechend, ab, weil durch die Abschmelzung des Eises die Dicke des Gletschers beständig abnimmt. Auch dies ist durch zahlreiche Beobachtungen bestätigt. (Mer de Glace, Rhonegletscher, Hintereisferner, Vernagtferner u. a. m).

Gelegentlich der Tiefbohrungen am Hintereisgletscher konnten Temperaturmessungen bis zu 148 m Tiefe ausgeführt werden. Sie ergaben, daß die Gletscherzunge in verschiedenen Tiefen die dem (Vertikal-)Druck entsprechende Schmelztemperatur hat. Diese Temperaturverhältnisse werden (mit Ausnahme der Oberflächenschicht) durch die Jahreszeiten kaum beeinflußt. Von welcher Stelle im Firn an die Schmelztemperatur herrscht, ist bis jetzt nicht sicher bekannt.

10. Spalten. Bei der Bewegung des Eises, wie sie vorausgehend in den Hauptzügen gekennzeichnet wurde, muß jede der vertikalen und zur Gletscherachse senkrechten Platten, in die man sich den Gletscher zerlegt denken kann, ausgewalzt werden. Die Hauptstreckung erfahren dabei die Randpartien, in denen die stärksten Aenderungen der Geschwindigkeit stattfinden. Die bei dieser Streckung auftretenden Zugspannungen sind häufig größer, als die Zugfestigkeit des Eises; dies muß dann zerreißen und die entstehenden Risse sind senkrecht zu den Richtungen der Zugspannungen. Die Randspalten müssen demnach beim Entstehen vom Rand schräg aufwärts gegen die Gletscherachse gerichtet sein. Das Reißen der Spalten ist von einem dumpfen Knall und einer fühlbaren Erschütterung der Eismasse begleitet. Durch den anfänglich kaum ein Viertelmillimeter breiten Riß fließen die oberflächlichen Schmelzwasser teilweise ab. Die Spaltenränder entfernen sich wegen der Abschmelzung und wegen der Bewegung immer mehr voneinader; im gleichen Maße, wie sich die Spalten oberflächlich erweitern, setzen sie sich in die Tiefe fort und einige Wochen nach dem Reißen klaffen fast senkrecht tiefe Schründe, welche die Wanderung auf dem Gletscher erschweren. Bei großen Gletschern gehen nur ganz in der Nähe des Randes die Spalten bis auf den Grund; gegen die Mitte finden sie ihre Tiefengrenze wohl meistens im oberen Drittel der Eismasse. Aber auf dem Grunde des Gletschers, an der Gletschersohle, bilden sich Spalten aus der gleichen Ursache wie am Rand; auch hier finden starke Aenderungen der Geschwindigkeit statt und die deshalb entstehenden Grundspalten sind anfänglich schräg aufwärts gerichtet. Grundspalten entstehen außerdem, wenn das Eis eine nach unten konvexe Krümmung erhält, wie etwa am Fuß von Steilstufen, wo es vom größeren zu kleinerem Gefälle übergeht. Umgekehrt wird am oberen Rande einer solchen Felsstufe das Eis eine nach oben konvexe Oberfläche erhalten; dann sind die obersten Eisschichten starken Zugkräften unterworfen und es bilden sich Spalten, welche annähernd dem Rande der Steilstufe parallel, also meist quer über den Gletscher laufen, Querspalten. Sie erhalten bei starken Gefällsänderungen große Weite und reichen sehr tief in die Eismasse hinab, so daß unter Umständen das Gewicht des vorderen Teiles zu groß ist, um von dem Querschnitt, der die Verbindung mit dem oberen Teile herstellt, noch getragen zu werden. Dann bricht das vorgeschobene Stück ab und stürzt der Höhe der Talstufe entsprechend in die Tiefe, um sich nach der Ankunft auf schwächer geneigtem Boden in Pyramiden, Zacken und Eisnadeln von grotesken Formen aufzulösen. Können die nachrückenden Eismassen über die Wand der Talstufe eine Verbindung mit den unten liegenden herstellen, so wird der Sturz der Eismassen durch den Widerstand der untenliegenden verlangsamt. Der entstehende Eisbruch (Sérac), dessen steile Wände

Digitized by Google

die wunderschön blaue oder blaugrüne Färbung des Eises besitzen, zeigt starke Zerklüftung in mehreren Richtungen, da außer den Querspalten auch noch Randspaltenbildung auftritt. Stürzen die Eismassen über sehr beträchtliche Höhe ab, so ist ein förmliches Zerstäuben die Folge. Die Trümmermasse schmiegt sich der Gestalt des auffangenden Untergrundes an und wenn sie genügend anwachsen kann, bildet sie einen regenerierten Gletscher, der mit seinem Nährgebiet keinen unmittelbaren Zusammenhang hat.

Tritt der Gletscher aus einer Talenge in eine Erweiterung, oder kann sich das Gletscherende auf flachem Boden ausbreiten, so fließt die Eismasse nach den Seiten auseinander, es entstehen Längsspalten, die annährend in der Strömungsrichtung des Eises verlaufen. Am Gletscherende zeigen diese Längsspalten fächerartige Anordnung; sie werden gegen den Rand des Eises immer weiter, da jede Ursache, sie wieder zu schliessen, fehlt. Dagegen werden Spalten aller Art, die in höher gelegenen Gletscherpartien gebildet werden, im Laufe der Bewegung des Eises wieder geschlossen. Auch im Firn treten Zugkräfte auf, welchen das Eis nur bis zu einem gewissen Grade Widerstand leisten kann. Doch sind hier die Randspalten, wegen der geringeren Bewegung, weniger häufig als auf der Gletscherzunge. Nur der Bergschrund (Randkluft), jene große Kluft, die in den obersten Firnhängen beim Uebergang vom steilsten zum weniger steilen Eis ziemlich senkrecht zur Fallrichtung verläuft, tritt mit großer Regelmäßigkeit auf. Er entspricht einer Querspalte und markiert die Stelle, von der an die eigentliche Bewegung des Gletschers beginnt. Die über der Randkluft gelegenen steilen Eispartien sind meist nur dünn und an den Untergrund angefroren, während der fließende Gletscher überall lose seine Unterlage berührt.

Im Sammelbecken der Gletscher entstehen Firnklüfte von großer Weite schon bei Neigungsänderungen, welche die Gletscherzunge ohne wesentliche Störung ihres oberflächlichen Zusammenhanges passieren kann. Spalten von 1 bis 2 m Breite finden sich im Firn an fast ebenen Stellen und solche von 10 und mehr Meter Weite gehören nicht zu den Seltenheiten. Auch hier kommen steile Abstürze vor und es hängt von der Höhe der Wand ab, ob in gewissen Zeiten abwechselnd mächtige Lawinen abstürzen, oder ob ein fast rein weißer Eisfall, in welchem die blauen Farben an den Wandungen der zertrümmerten Masse (die noch sehr lufthaltig ist) fast ganz fehlen, den oberen Rand der Abbruchstelle mit dem unteren flacheren Gebiete verbindet. Die Spalten in den oberen Teilen des Firnes sind nur im Spätjahr, wenn der Gletscher weit ausgeapert ist, bequem sichtbar; dann findet man auch leicht die Stellen, Schneebrücken, an denen die Klüfte überquert werden können. Früher, im Hochsommer, sind die Firnspalten meist noch verschneit; nur für sehr geübte Augen ist, wenn nicht frischer Schnee gefallen ist, ihre Lage auf einige Meter Entfernung erkennbar. Sie bilden dann ein sehr tückisches und gefährliches Hindernis für die Gletscherwanderer, die in diesem Gebiete durch Seilverbindung sich gegenseitig sichern müssen.

Die Zerklüftung, wie sie hier geschildert wurde, trifft in erster Linie für die Gletscher des alpinen Typus zu. Aber auch im grönländischen Inlandeis, sowohl in der Nähe der randlichen Nunataker, als im Inneren, gibt es Spalten und ebenso wissen wir, daß die von mächtigen Hochgebirgen herabziehenden Eismassen des antarktischen Kontinentes stark zerklüftet sind. Auch hier zeigt sich also der Einfluß der Bodenformen auf die Gestaltung der Gletscheroberfläche. Die Mächtigkeit der Inlandeisdecken kann demnach nicht außergewöhnlich groß sein.

11. Struktur. Die Firnschichtung ist auf ausgedehnten Flächen zerklüfteten Firnes gut zu sehen. Während der Bewegung des Eises erfahren die anfänglich fast horizontalen Schichten starke Deformation; sie werden in löffelförmige, ineinander liegende Schalen ausgewalzt, deren Ränder sich gegen die Ränder der Gletscherzunge und gegen das Gletscherende steiler aufrichten, während die axialen Teile flach bleiben. Diese durch Umformung aus der Schichtung hervorgegangene Struktur ist auf der Gletscherzunge als Bänderung vorhanden und durch das Ausgehende abwechselnd luftfreien blauen und luftreichen weißen Eises gekennzeichnet, das als eine Schar nach unten konvexer Linien über die Eisoberfläche läuft (Ogiven). Der Zusammenhang zwischen Schichtung und Bänderung ist durch Beobachtung (H. F. Reid) des allmählichen Ueberganges erkannt. Bei zusammengesetzten Gletschern hat jeder Zufluß für sich sein System von Ogiven; an der Vereinigungsstelle zweier Zuflüsse stellen sich die Bänder beider Teile nahezu vertikal.

Außer dem der Bänderung gibt es noch blaues und weißes Eis an vielen Stellen der Gletschermasse. So entstehen Einlagerungen von blauem Eis, wenn Wasser in Spalten eindringt, die sich während der Bewegung teilweise schließen und keinen Abfluß gewähren. Die Kristallachsen des klaren blauen Eises, das aus dem allmählich gefrierenden Wasser entsteht, sind senkrecht zu den Spaltenwänden. Fällt jedoch Schnee in solche sich schließende Spalten, so wird er in lufthaltiges, weißes Eis umgeformt.

Digitized by Google

Auch aus Querspalten können bei Schrägstellung ihrer Wände, längs deren feine Schmutzpartikeln verschoben werden, ogivenähnliche quer über die ganze Gletscheroberfläche (und Obermoränen) laufende Kurven entstehen. Oder es können in Eisbrüchen ausgedehnte parallele Eiswände in sich zusammenstürzen, während die benachbarten stehen bleiben. Die Abschmelzung wird beide Partien stark verändern, aber die Unterschiede im lufthaltigen aus dem zertrümmerten Material neugebildeten Eise und dem benachbarten anderen bleiben unterhalb des Eisbruches noch auf weite Strecken erhalten (Schmutzbänder).

Gletscherkorn. Ein Stück Gletschereis ist aus Körnern zusammengesetzt, deren jedes ein Kristall von ganz unregelmäßigen Begrenzungen ist, so daß die Gletscherkörner gelenkartig ineinandergreifen. Die Grenzflächen der Körner sind für gewöhnlich nicht sichtbar. Sie werden es, wenn Schmelzwasser durch die feinen Haarspalten zwischen den Körnern in die Eismasse eindringen kann; dann schmilzt das an den Korngrenzen vorhandene Eis etwas leichter, als das der Kornmasse selbst. Die Kristallachsen der Gletscherkörner liegen wirr durcheinander; es soll übrigens doch bei den Gletscherkörnern vom Ende des Gletschers, die auf ihrem langen Wege viele Umkristallisationen und Umlagerungen erfahren haben, eine Parallelstellung in der Achsenrichtung benachbarter Körner auftreten.

Im Firn sind die Gletscherkörner klein, etwa von Erbsengröße und durch Zusammenschmelzen mehrerer Schneekristalle entstanden. Am Gletscherende haben die Körner klaren, fast luftfreien Eises die Größe von Taubeneiern, ja von Fäusten. In der Zeit, welche der Firn braucht um den Weg bis ans Gletscherende zurückzulegen, ist also die Zahl der Gletscherkörner immer kleiner, das durchschnittliche Volumen eines Kornes aber immer größer geworden. Bei diesem Prozeß des Kornwachstums werden die kleinen Körner von der größeren aufgezehrt. Die Ursache des Kornwachstums, das sich an allen Stellen innerhalb der Gletschermasse vollzieht, ist in den durch die Bewegung der letzteren veranlaßten Druckschwankungen zu suchen, durch welche teilweises Schmelzen und darauffolgendes Wiedergefrieren benachbarter Körner zustande kommt. Bei diesem Umkristallisieren wirkt die Anziehungskraft der größeren Körner richtend auf die fest werdenden Eispartikelchen. Für das langsam stattfindende Kornwachstum genügen ganz geringe Druckschwankungen im Eise, das auf Schmelztemperatur ist. Ein Beispiel für die Zusammensetzung des Gletschereises gibt ein Block vom Ende des Glacier des Bossons (Montblancgruppe). Er bestand aus 40 Körnern mit einem durchschnittlichen Gewicht von 30 g; die 16 größten wogen im Mittel je 65 g, die 10 kleinsten je 2,5 g. Bei den Umkristallisationen wird auch die Luft immer mehr ausgetrieben; mehrere kleinere Luftblasen vereinigen sich zu einer größeren; deshalb muß die Reinheit und Klarheit des Eises gegen das Gletscherende hin beständig zunehmen.

12. Theorie der Gletscherbewegung. Die über Bewegung, Spalten und Struktur des Gletschereises beobachteten Tatsachen sind mit einer Theorie vereinbar, welche die Bewegung des Eises mit der einer sehr zähen Flüssigkeit vergleicht, die an ihrem Bette durch Reibungswiderstände gehemmt wird. Die Umfangsgeschwindigkeit ist in den verschiedenen Tiefen eines Querschnittes verschieden groß und ändert sich von Querschnitt zu Querschnitt. Daher darf die Bewegung nur als ein Fließen oder Strömen, nicht aber als Gleiten auf fester Unterlage aufgefaßt werden. Ursache der Bewegung ist die Schwerkraft. Die beim Abwärtsbewegen erzeugte Energie wird z. T. innerhalb der Eismasse in Wärme verwandelt und hält die Temperatur derselben auf dem Schmelzpunkt. Die im Eis von Schmelztemperatur, das unter Druck steht, notwendig vorhandene Wassermenge ist wesentliche Ursache der Plastizität des Eises, welche diesen Körper zum Fließen befähigt. Weil der Druck mit der Tiefe zunimmt, wächst auch diese Wassermenge und deshalb muß die Verschiebbarkeit der Eisteilchen (Gletscherkörner oder Plättchen, aus denen ein Korn besteht) mit der Tiefe wachsen. Es ist wahrscheinluich, daß die Differenz zwischen Oberflächen- und Grundgeschwindigkeit in einer Vertikalen dem Quadrate der Eistiefe proportional ist.

Die geometrischen Beziehungen, welche für eine strömende Eismasse bestehen, sind in S. Finsterwalders Strömungstheorie des Gletschers klar entwickelt. Diese Theorie hat mit der Erklärung der Bildung von Innenmoränen (s. u.) einen besonderen Erfolg aufzuweisen.

Sie gibt vollständige Aufklärung über die Ursache der Geschwindigkeitsabnahme gegen das Gletscherende. „Es genügt vollständig die oberflächliche Ablation und die dadurch erzeugte Verminderung der strömenden Eismassen in Betracht zu ziehen, um bei den auftretenden Gletscherformen die Erscheinung vorauszusehen." Ebenso sind das Stranden der Bewegungslinien am Gletscherrande sowie die gegen diesen zunehmende Krümmung der Oberfläche auf Grund dieser Theorie leicht zu verstehen. Ihr wesentlicher Inhalt besteht in Folgendem. Die Firnlinie teilt den Gletscher in zwei Gebiete, das Nährgebiet und das Abschmelzgebiet. Ein

Digitized by Google

Eisteilchen, das im Firn anfällt, tritt in die Gletschermasse ein und beschreibt in ihr während der Bewegung des Gletschers eine Stromlinie, die im Abschmelzgebiet wieder auf die Gletscheroberfläche kommt, aus dem Gletscher austritt. Benachbarte Eisteilchen beschreiben benachbarte Stromlinien. Je höher im Firngebiet eine Stromlinie in den Gletscher eintritt, um so näher am Zungenende verläßt sie die Gletschermasse. Es kann auf diese Weise das ganze Firngebiet auf die Zungenoberfläche geometrisch abgebildet werden. Die Punkte der Firnlinie entsprechen dabei sich selbst.

Wird der Gletscher als stationär vorausgesetzt, ändert sich also seine Oberflächenform an keiner Stelle, so muß in einer aus lauter Stromlinien gebildeten Röhre durch jeden Querschnitt in der nämlichen Zeit die gleiche Menge Eis befördert werden (Kontinuitätsbedingung). In sehr viele solcher Röhren kann man sich den Gletscher zerlegt denken; es kann keine Stromlinie aus einer dieser Röhren in eine benachbarte übertreten. Damit wird nicht nur jeder Punkt der Firnoberfläche je einem Punkt der Zungenoberfläche eindeutig zugeordnet, sondern einer durch ein Netz von Längs- und Querlinien vorgenommenen Teilung des Firns entspricht eindeutig eine ähnliche Teilung der Zunge. Hat eine Masche des Netzes im Firn die Fläche F, die ihr zugeordnete auf der Zunge die Fläche f, und fällt in der Zeiteinheit, senkrecht zur Gletscheroberfläche gemessen, pro Flächeneinheit die Substanzmenge A an, während die ebenso gemessene Ablation auf der Zunge a beträgt, so sagt die Kontinuitätsbedingung zunächst

$$F.A = f.a.$$

Treten in F die Stromlinien mit der Geschwindigkeit V unter dem Winkel Φ in die Gletschermasse ein und in f unter dem Winkel φ mit der Geschwindigkeit v aus, so ergibt dieselbe Bedingung auch die Beziehung $F.V \sin \Phi = f.v. \sin \varphi$.

Wo die Geschwindigkeit abnimmt und die Ablation wächst, muß beim stationären Gletscher auch die Böschung wachsen; daher die zunehmende Steilbeit der Oberfläche gegen den Rand und das Ende. Ueberschreitet die Ablation die Geschwindigkeit, so wird $\sin \varphi = \frac{a}{v} > 1$, d. h. der Gletscher kann nicht mehr stationär sein (Rückgang). Wird die Akkumulation A im Firn größer als V, so muß der Gletscher wachsen. — Für einige Gletscher der Alpen (Hintereis, Forno, Rhone), für welche die Ablation und die Geschwindigkeit im Firn und auf der Zunge an möglichst vielen Punkten gemessen wurde, konnten die Winkel Φ und φ ermittelt werden. Es fand sich sinngemäße Uebereinstimmung mit den Böschungsverhältnissen in Firn- und Abschmelzgebiet.

Für das Innere des Gletschers sagt die Kontinuitätsbedingung, daß für benachbarte auf den Stromlinien senkrechte Querschnitte F_1 und F_2 mit den Geschwindigkeiten v_1 und v_2

$$F_1 . v_1 = F_2 . v_2.$$

Mit Beachtung dieser Beziehung kann aus den beobachteten Werten der Oberflächengeschwindigkeit und der Ablation die Ermittelung der Eistiefe an einer Stelle des Gletschers vollzogen werden, die innerhalb des Beobachtungsgebietes liegt. Die für den Hintereisgletscher durchgeführte Rekonstruktion ergab Tiefen, welche mit den durch spätere Bohrungen gefundenen auf ca. 4% übereinstimmen (vgl. oben Abschnitt 9). Auf das Firngebiet wurden die theoretischen Betrachtungen bisher nur insoweit angewandt, als es sich um die während der Eisbewegung eintretende Deformation der Schichtflächen handelt. Ein sehr wichtiges Ergebnis der Strömungstheorie wurde durch deren Urheber mit der Erklärung der Moränenbildung erzielt (vgl. unten 13: Anordnung des Schuttes). Beim Zusammenfluß zweier Gletscher kommen Randgebiete der beiden in Berührung; es kann aber kein Ineinanderfließen stattfinden; vielmehr wird eine schuttführende Trennungsfläche zwischen beiden Gletscherteilen bestehen, die entweder schon vom Beginn des Zusammenflusses an, oder erst unterhalb auf der Gletscheroberfläche durch einen Schuttstreifen gekennzeichnet wird.

13. Eis und Fels. Wasser, das bei normalem Druck in Gestein eindringt und dort wegen Temperaturerniedrigung gefriert, muß eine Sprengwirkung auf das Gestein ausüben, weil es sich beim Festwerden ausdehnt. Es entstehen Risse im Fels und schließlich werden einzelne Bruchstücke von demselben losgesprengt. Auf diese Weise entsteht auch der feine Verwitterungsstaub, der sich überall in den Hochgebirgsregionen findet und z. B. auf den Firnfeldern ablagert. Solche Frostverwitterung findet aber auch an der Sohle des Gletschers statt. Querschnittsänderungen, Gefällsänderungen der Eismasse bedingen Druckschwankungen innerhalb derselben, die besonders stark bei Bewegungshindernissen auftreten. Hier wird das Eis teilweise schmelzen und soweit es fest bleibt, seine Temperatur erniedrigen. Das unter hohem Druck gebildete Schmelzwasser dringt in das Gestein unterkältet ein und gefriert, sobald es unter geringerem Druck steht. Der Betrag, welcher durch solche Frostverwitterung vom festen Fels im Laufe eines Jahres abgelöst wird, schwankt mit der Dichte und Härte des Gesteins. Klüftbarkeit des letzteren und der Verlauf der Klüftungs-

Digitized by Google

flächen gegenüber der Bewegungsrichtung des Eises werden ebenfalls von Einfluß sein. Was an der Firnumrahmung eines Gletschers abwittert und seine Unterlage verliert, stürzt auf die Firnoberfläche; frisch fallender Schnee überdeckt die Felstrümmer, welche mit diesem langsam zum Boden der Firnmulde hinabsinken, wo sie in das Eis eingebacken, mit der diesem eigenen Geschwindigkeit weiter zu Tal wandern. Sie bleiben stets auf der Unterfläche des Gletschers und bilden den ursprünglichen Bestandteil der Untermoräne (Grundmoräne). Sie kommen mit der Felsunterlage in unmittelbare Berührung und bearbeiten diese in ähnlicher Weise, wie die auf Leinwand gekitteten Schmirgelkörner Metalle schleifen und polieren. Das Gletscherbett zeigt überall die Spuren dieser Bearbeitung des Felses, dessen Oberfläche geschrammt und poliert, gerundet und geschliffen erscheint (Rundhöcker, Gletscherschliffe). Je nach der Härte des Gesteins werden die schrammenden und kratzenden Geschiebe, die natürlich selbst kantengerundet und gekritzt werden, ihre Spuren verschieden tief eingraben, welche als nahezu parallele Streifen annähernd in der Bewegungsrichtung des Eises verlaufen. Der Schleifprozeß wird durch die Klüftbarkeit und die Elastizität des feuchten Gesteins begünstigt und verstärkt, so daß als Produkte der Glazial-Erosion schließlich nicht nur feiner Schlamm und Schleifsand auf der Gletschersohle abtransportiert werden, sondern auch die durch Frostverwitterung und einseitige Druckspannungen gelockerten grösseren Gesteinsfragmente dem Trümmerwerk der Untermoräne einverleibt werden. Sand und Schlamm werden durch die Schmelzwasser der Gletschersohle dem Gletscherbach zugeführt, von diesem talauswärts verfrachtet und in um so größeren Entfernungen vom Ursprungsort abgelagert, je kleiner ihr Korn ist. Ganz feiner Schlamm bleibt auch noch in den Gletscherabflüssen suspendiert, wenn sie längst das Gebirgsvorland erreicht haben. Die von Gletscherbächen mitgeführten festen Bestandteile schwanken zwischen einigen Gramm und 13 kg pro Kubikmeter Wasser, soweit bisher Messungen vorliegen. Die daraus berechneten Größen des Abtrages der sich für ein Gletschergebiet ergibt, schwanken entsprechend zwischen einigen Tausendstel Millimeter und 19 mm pro Jahr. Diese Zahlen müssen, um den wirklichen Abtrag für ein Gletschergebiet zu geben, noch um die Gesteinsmassen vergrößert werden, welche vom Gletscher abgelöst, aber nicht vom Gletscherbach, sondern unter, im und auf dem Gletscher transportiert werden. Die großen Zahlen für den Abtrag sind für große Gletscher (Alaska), die kleinen für kleine erhalten. Man kann also wohl sagen daß die glaziale Erosion mit der Größe der Gletscher und mit deren Geschwindigkeit wächst. Man ist von vornherein zu der Annahme geneigt, daß an Stellen stärkster Geschwindigkeit auch die Erosion am bedeutendsten ist (wenn das Gestein auf der ganzen Unterlage gleichartig ist). Solche Gebiete sind die Region der größten Dicke des Eisstromes, die Stellen, welche kurz oberhalb der Eisbrüche liegen und die Strecken starker Neigung bei diesen Brüchen. Der Gletscher arbeitet also in der Region größter Geschwindigkeit an einer beständigen Tieferlegung seines Bettes und bei Talstufen an einer Verringerung der Neigung derselben. Der ausgehobelte Schutt wird nahe dem Ende abgelagert, wo auch wegen Abnahme von Druck und Bewegung die Erosionswirkung klein ist. Bei einem Alpengletscher ist also das Ergebnis der erodierenden Tätigkeit eine zunehmende Verflachung des Bettes, in welchem die Zunge talaus gepreßt wird und eine Zunahme der Neigung an den Wandungen des Firngebietes.

Der Querschnitt des Gletscherbettes erhält die Form eines breiten ‿ im Gegensatz zu dem V förmigen Querschnitt eines durch Wassererosion entstandenen Tales.

Auch bei kleinen, über der Schneegrenze liegenden Firnmassen findet Erosion und Verwitterung der Bergwandung statt, welche wegen des Abtransportes der Erosionsprodukte immer mehr zurückweicht. Rückschreitende Erosion und Karbildung. Von besonderer Wichtigkeit ist die Beachtung der erodierenden Wirkung des bewegten Eises bei Beurteilung des Anteiles, welcher den Gletschern der Eiszeit an der Modellierung der Erdoberfläche zukommt. Die Alpentäler z. B. sind von der oberen Schliffgrenze bis hinab zu ihren heutigen Sohlen, d. h. stellenweise 1600 m tief, unter Mitwirkung des Eises ausgestaltet; ebenso werden die Seen des Alpenvorlandes als Produkte glazialer Erosion angesehen.

Die kleineren Täler zeigen an ihrem Uebergang in die großen Täler höher gelegene Sohlen, als diese. Die Haupttäler sind gegen die Seitentäler (Hängetäler) übertieft; in ihnen hat der mächtigere Gletscher stärker erodiert, trotzdem sie kürzere Zeit vom Eis erfüllt waren, als diese, weil sich neben der größeren Eismasse die Wirkungen des druckhaften plastischen Gesteins hier am stärksten geltend machten.

Wo besonders hartes und widerstandsfähiges Gestein das Gletscherbett bildet, muß dieses enger sein; es bleiben Felsriegel und Bodenschwellen stehen, wie sie in ehemals vergletscherten Tälern häufig gefunden werden: Selektive Erosion (z. B. Talenge Rhoneknie bei St. Maurice).

Anordnung des Schuttes. a) Bewegte Moränen. Was an der Firnumrah-

mung eines Gletschers abwittert und auf diesen fällt, kommt allmählich auf die Gletschersohle und bleibt Untermoräne. Was am Rande der Gletscherzunge abwittert und auf die Zungenoberfläche fällt, wird hier forttransportiert und ordnet sich zu einem Walle, Seitenmoräne, der so lange parallel dem Rande läuft, bis er an Stellen geringerer Neigung des Gehänges sich mit der Grund- (oder Unter-)moräne vermengt oder bis der Gletscherbach ihn zerstört und wegschwemmt.

Treten im Inneren der Firnfläche Felsinseln auf, welche vom Eis umflossen werden, so wird am Grunde beider Gletscherarme eine Bearbeitung der Insel stattfinden. Von der Vereinigungsstelle der Arme an bis zum Ende des Gletschers zieht dann im Inneren der Eismasse eine schuttführende Wand, Innenmoräne, deren Schuttmasse von beiden Seitenflächen der Insel stammt, also gekritztes Grundmaterial ist. Liegt die Vereinigungsstelle noch im Firn, so wird auch hier noch Schnee anfallen, der erst unterhalb der Firngrenze abschmilzt; also kann der Inhalt der Schuttwand erst unterhalb der Firngrenze auf die Oberfläche der Gletscherzunge gelangen. Von der obersten Ausschmelzstelle an zeigt sich auf der Zunge eine Obermoräne (Mittelmoräne, Längsmoräne) die gegen das Ende des Gletschers immer breiter wird, da stets neues Material der Innenmoräne das der Obermoräne vermehrt. Liegt die Vereinigungsstelle der die Insel umfließenden Gletscherarme, also auch z. T. die Insel selbst unterhalb der Firngrenze, so wird von hier aus eine aus der Innenmoräne gebildete nach unten breiter werdende Obermoräne bis ans Gletscherende ziehen.

Zu dem aus Grundmoränenmaterial bestehenden Schutt dieser Innenmoräne kann auch noch Abwitterungsmaterial kommen, das von den die Gletscheroberfläche überragenden Felsen der Insel stammt. Im ersten der beiden Fälle wird es sich mit dem Grundmaterial vereinen, also selbst Grundmaterial und auch gekritzt werden, da es ja von der Firnumrahmung stammt. Im zweiten Fall, wenn die Insel ins Abschmelzgebiet eingreift, bildet das von einem Teil ihrer Felsen abwitternde Material nur einen nicht gekritzten Bestandteil der Obermoräne, der aber, gleichbleibende Schuttproduktion vorausgesetzt, längs des ganzen Walles der Obermoräne gleich bleibt, während das Grundmaterial sich abwärts immer stärker vermehrt.

Felshindernisse im Firn, welche die Gletscheroberfläche nicht überragen, liefern Innenmoränen, die um so näher dem Gletscherende auszuschmelzen beginnen, je höher oben die Hindernisse liegen. Sie bestehen, wie die im ersten der vorigen Fälle, nur aus Grundmaterial.

In den Wänden von Spalten, welche quer durch Obermoränen laufen, sieht man nahezu vertikal verlaufende Streifen, längs deren Schutt aus dem Eise tritt; sie sind die Spuren der Innenmoräne in den Spaltenwänden. Auf der Oberfläche der Gletscherzunge zeigt sich die Spur der Schuttwand der Innenmoräne als ein feuchter Streifen, längs dessen verschieden große, häufig hochkant gestellte Schuttstücke ausschmelzen (Naht). Das Vorhandensein der Innenmoränen ist ein direkter Beweis für eine auf der ganzen Gletschersohle stattfindende Erosion.

Bei Felsinseln, welche ganz im Bereiche der Gletscherzunge liegen, tritt Grundschutt auf die Eisoberfläche, der sich mit Randschutt mischen kann. Von der Insel an abwärts zeigt sich ein Schuttstreifen von gleich bleibendem Inhalt. In diesem Falle ist aber die Obermoräne nicht mit einer Innenmoräne verbunden.

Sind die Bewegungslinien, die Verteilung der Geschwindigkeit über die Gletscheroberfläche sowie auf dem Grunde bekannt, so ist man imstande aus der längs einer Innenmoräne pro Jahr ausschmelzenden Schuttmenge auf die Größe des jährlichen Abtrages zu schließen. Solche Messungen wurden am Hintereisgletscher angestellt und ergaben einen Abtrag von mindestens 0,027 mm pro Jahr.

Grundmoränenmaterial wird auch noch vom Eise in Grundspalten aufgenommen, die quer durch den Gletscher laufen. Kommen diese Eispartien in die Nähe des Randes, so kann der Schutt auf den Verschiebungsflächen, die sich zwischen bodennahen, während des Winters festangefrorenen Eisschichten und den nachdrängenden Eismassen bilden und längs der alten Spaltenwände verlaufen, wegen der Abschmelzung allmählich an die Oberfläche gelangen, wo er dann als Quermoräne auftritt. Auch solcher Schutt, der durch seitliche Wasserläufe im oberen Zungen- und Firngebiet auf den Grund von Spalten kam, die sich später wieder schlossen, kann in der Nähe des Gletscherendes eine Quermoräne bilden.

Die Anordnung der bewegten Mo-

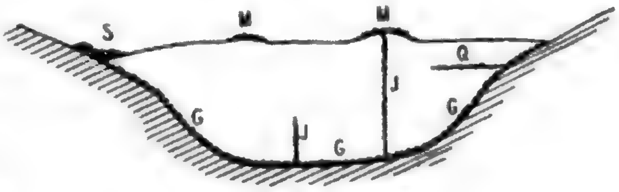


Fig. 1.

S = Seiten-Moräne } Obermoränen
M = Mittel- „ }
I = Innen- „ } Innenmoränen
Q = Quer- „ }
G = Grund- „ } Untermoräne.

Digitized by Google

ränen läßt sich demnach in einem dem Gletscherende nahen (Ideal)-Querschnitt veranschaulichen, wie ihn die Figur 1 gibt.

b) Abgelagerte Moränen. Aller Schutt, der auf, in oder unter dem Eise befördert wird, gelangt mit dem Verschwinden des Transportmittels zur Ablagerung.

So lange ein Gletscher stationär ist, kann die Ablagerung, die nur an seinem Rande eintritt, bloß zur Bildung wallförmiger Schutthügel führen, welche den Gletscherrand umdämmen. Es entstehen Ufer- und Endmoränen, indem an den Längsufern und an der Gletscherstirn beständig Grundmoräne unter dem Eise hervorquillt, die sich an einzelnen Stellen mit dem von den Obermoränen herstammenden Material mischt, wenn dieses von der steil abfallenden Gletscheroberfläche abrutscht.

Schwindet der Gletscher, so hört die Bildung von Schuttwällen auf. Das abgelagerte Material bildet dann eine ziemlich gleichförmige Decke über das eisfrei gewordene Gebiet, in welchem auch die Bestandteile der Innen- und Obermoränen in Streifen angeordnet als Längsmoränen zur Ruhe kommen.

Rückt der Gletscher vor, so bewegt sich das Eis zunächst über die vorgelagerte Moränendecke, die nun als Ganzes zur Grundmoräne wird und unter hinreichend starker Eisdecke weiter talwärts wandert. Ein schwacher Schuttwall umgibt den Rand des vorschreitenden Eises; es ist die erste Anlage einer neuen Endmoräne, welche beim folgenden Stillstand des Eises weiter ausgebildet werden kann.

Auch wenn der Rückgang eines Gletschers durch länger dauernden Stillstand unterbrochen wird, kann ein Endmoränenwall aufgeschüttet werden. Deshalb sieht man häufig auf der dem zurückgegangenen Gletscher vorgelagerten Moränendecke solche Wälle; ihre Zahl entspricht dem Minimum von Stillstandslagen, welche während der Rückzugsperiode eintraten.

Bei großen Gletschern, welche an ihrem Ende auf breitem, flachen Boden auseinanderfließen, zeigen die Längsmoränen radiale Anordnung innerhalb der Moränendecke, welche sie mehr oder minder hoch überragen. Diese Längsrücken entsprechen den Drums oder Drumlins, welche in der Endmoränenlandschaft eiszeitlicher Gletscher gefunden werden.

Gletscher, die ins Meer endigen, schieben natürlich auch ihre Schuttlast der Obermoränen, ebenso wie die Untermoräne dahin. An der Stelle, wo das Eis wegen des Auftriebes vom Boden abgehoben ist, entsteht auf diesem ein Schuttwall.

Da die Erosionsfähigkeit eines Gletschers gegen das Ende zu immer kleiner wird, vor dem Gletscher aber, wegen der häufigen Schwankungen, eine Aufschüttung stattfindet, so kann das Zungenende eines auf flachem Boden auslaufenden Gletschers in einer muldenförmigen Vertiefung liegen. Diese Senke, das Zungenbecken ist an den Gletschern der Gegenwart nicht, oder nur schwer nachzuweisen, innerhalb der Endmoränenlandschaft der eiszeitlichen Gletscher bildet es eine charakteristische Eigentümlichkeit.

c) Alluvionen des Gletscherbaches. Die durch die Eisbewegung verursachten Schuttablagerungen erfahren durch das schlammreiche Wasser des Gletscherbaches Störungen. An einer oder mehreren Stellen durchbricht der Bach die Endmoräne, deren Geschiebe er teilweise fortrollt und außerhalb des Moränenkranzes, mit Schlamm und Sand gemengt, ablagert. Es kommt so zur Ausbildung großer Schotterflächen (Sandr): das vor dem Eise liegende Gebiet wächst über die Sohle des Eises empor; es entsteht vor der Endmoräne ein Schwemmkegel, Uebergangskegel, der stellenweise mit der Endmoräne eng verbunden, verzahnt ist. Vor den großen Gletschern in Island und Alaska wurden Sandr und Uebergangskegel beobachtet. In den Alpen sind 5 bis 10 km vom Ende des Gletschers in den Ablagerungen der Bäche die Spuren des Gletschertransportes vollständig verwischt.

Schutt, welcher durch Längsspalten am Gletscherende auf den Grund fallen kann, wird dort mit Sand und Schlamm gemengt, stellenweise auch geschichtet, wenn der Gletscherbach ihn transportiert. Bei den eiszeitlichen Gletschern haben solche Bildungen teilweise große Ausdehnung erhalten (Osen, Eskers, Kames).

14. **Ernährung der Gletscher.** Die Gletscher verdanken ihr Bestehen in erster Linie der Niederschlagsmenge, welche in den Sammelgebieten in fester Form anfällt. Diese schwankt mit den klimatischen Verhältnissen der Gletschergebiete und ist in küstennahen Strichen der Hochgebirge größer, als in küstenfernen. Messungen über die jährliche Schneemenge in den Hochregionen sind bisher nur an einzelnen Stellen in den Alpen eingeleitet. Nach unserer bisherigen Erfahrung darf für die Firngebiete der zentralen Ostalpen etwa 1 m Niederschlagshöhe pro Jahr (als Wasser gemessen) angenommen worden. Für die Randzone und die Westalpen ist die Niederschlagsmenge wohl etwas größer anzusetzen. Im Kaukasus soll sie bis zu 4 m, in Alaska bis 7 m betragen (nach Schätzungen). Auf Grönland und den übrigen arktischen Eisfeldern, sowie in der Antarktis wurden bisher immer nur kleine jährliche Schneemengen beobachtet; doch fehlen gerade hier eigentliche Messungen in

Digitized by Google

den Hochregionen der Eisdecken. Von der im Firn anfallenden Niederschlagsmenge geht jedoch während der Zeit hohen Sonnenstandes und klaren Wetters ein beträchtlicher Teil durch Verdunstung in die Luft zurück; der Rest sinkt abwärts und dient zur Ernährung der Gletscher.

Auch Schnee, der auf die Gletscherzunge fällt, sowie Lawinen, die auf ihr abgelagert werden, vermehren die Gletschermasse; beide tragen also zur Erhaltung der Eisströme bei.

Aufzehrung der Gletscher. In den Hochgebirgen erfolgt die Auflösung der Gletscher durch Wärme die dem Eise entweder durch direkte Bestrahlung, oder durch bewegte Luft, durch Regen und Tau, durch die Schmelzwasser und endlich durch das Gestein, auf dem der Gletscher liegt, zugeführt werden kann. Strahlung, Luftwärme, Niederschläge und Schmelzwasser, die über die Gletscheroberfläche herabrinnen, wirken hauptsächlich auf die Oberfläche ein und ergeben als Summe ihres Einflusses die Abschmelzung von oben, die Ablation. Schmelzwasser, die von oben durch Spalten in das Innere der Eismasse gelangen, Wasser, das von den seitlichen Talabhängen herab unter den Gletscher fließt, Luftströme, welche in Höhlungen mit den Wassermassen fortgerissen werden, helfen mit das Eis zu zerstören. Gegen die durch Ablation und Wasserläufe bewirkte Schmelzung des Gletschers ist die von der Erdwärme auf der Gletschersohle verursachte klein. Für Küstengletscher, welche ins Meer endigen, tritt zu den angeführten Mitteln, welche die Aufzehrung bewirken, als ein weiteres die Bildung von Eisbergen hinzu.

Ablation. Für die Ablation ist, ebenso wie für die Verdunstung im Firn der Hauptfaktor die Strahlung, deren Intensität für die alpinen Gletschergebiete zu etwa 2,1 cal/cm² in der Minute bei schwarzer Auffangfläche, die zur Richtung der Wärmestrahlen senkrecht ist, angenommen werden kann. Die Strahlungswirkung auf das Eis hängt von der Exposition der Eisoberfläche gegen die Sonnenstrahlung und von der Reinheit des Eises ab. Wo eine dünne, dunkle Sanddecke auf dem Eis liegt, schmilzt diese bis zu einer gewissen Tiefe in das umgebende reine Eis ein. Grober Schutt, oder dicke Sandschichten, die sich nur in den obersten der Sonne zugekehrten Teilen stark erwärmen, schützen das darunter liegende Eis gegen Abschmelzung; es bilden sich unter dicken Sandlagen Eiskegel aus, die ihre Umgebung um so mehr überragen, je mächtiger die schützende Decke ist. Auf den Himalayagletschern und am Rande des Inlandeises in N E Grönland wurden solche Kegel von 15—20 m Höhe beobachtet. Auf Alpengletschern, häufig bei Quermoränen zu sehen, erreichen sie bis 5 m Höhe. Unter großen Steinen bleiben Eispfeiler erhalten, so daß die Steine, wie Tischplatten auf einem Eisfuß ruhen (Gletschertische), von dem sie im Laufe der Zeit in der Mittagsrichtung abrutschen. Die schützende Wirkung, welche grober Schutt auf das Eis ausübt, ist auch die Ursache davon, daß die Obermoränen auf Eiswällen liegen, die vielfach recht beträchtliche Höhen (10 bis 20 m über die umgebende Oberfläche) erreichen. Der Anteil der einzelnen Faktoren, von denen der Ablationsbetrag abhängt, kann bis jetzt nicht getrennt angegeben werden. Die gesamte Größe des oberflächlichen Abtrages ist mehrfach gemessen worden, indem man Stäbe in Bohrlöcher versenkte und deren Ausschmelzen beobachtete. Für Alpengletscher fand sich die Ablation bis zu 18 m/Jahr; in Grönland wurden 2 bis 2,3 m/Jahr gemessen, in Lappland bis zu 3,3 m/Jahr. Der Ablationsbetrag wächst von der Firnlinie bis zum Gletscherende rasch an, er ist auch in den seitlichen Randgebieten größer, als in der axialen Zone. Die Abschmelzung an der Oberfläche erfolgt hauptsächlich tagsüber und nur während der warmen Jahreszeit. Nachts und im Winter ist die oberste Kruste des Gletschers meist gefroren. Die Schmelzwasser bilden zunächst kleine Bäche, welche über die Gletscheroberfläche rinnen. An Spalten werden sie in diese stürzen und entweder bis auf den Grund gelangen, oder die Ausbildung von Kanälen im Eis veranlassen, welche in der Talrichtung und allmählich auch gegen den Grund verlaufen. Hier vereinigen sich die einzelnen Wasserläufe zum Gletscherbach, der am Ende des Gletschers aus dem Gletschertor hervorbricht. Wenn die Spalten, in welche Oberflächenbäche stürzen, im Laufe der Bewegung geschlossen werden, so bleiben doch häufig die von dem Sturzbach erzeugten vertikalen Kanäle noch lange erhalten: Gletschermühlen; sie wandern mit dem Eise talwärts. Gehen diese Kanäle bis zum Grund, so werden durch das abstürzende Wasser Steine der Grundmoräne in rasche Rotation versetzt; sie können bei hinreichender Härte das feuchte, druckhafte Gestein des Gletscherbettes stark bearbeiten und kreisförmige Vertiefungen in diesem erzeugen, wenn die Fortschreitungsgeschwindigkeit des Eises nicht sehr groß ist. Auf diese Weise kann man sich die Riesentöpfe und Strudellöcher in den Randzonen der eiszeitlichen Gletschergebiete entstanden denken, auf deren Grund häufig die Rollsteine gefunden werden.

Am Muirgletscher in Alaska wurden auch Kanäle beobachtet, die innerhalb des Eises parallel zum Grund bis ans Gletscherende verlaufen.

Die Abschmelzung durch die Erdwärme beträgt ein Neuntel bis ein Siebentel

der an der Oberfläche des Gletschers stattfindenden. Sie kann aus der winterlichen Wassermenge der Gletscherbäche ungefähr bestimmt werden. Abschmelzung durch warme Quellen kann nur in seltenen Fällen sicher nachgewiesen werden.

Oberflächenbäche, Schuttbedeckung, Rundung der Spaltenwände durch die Abschmelzung, Wechsel zwischen Bändern blauen und weißen Eises geben der Gletscheroberfläche im Sommer auch an Stellen geringer Neigung eine sehr unebene Beschaffenheit, welche kurz nach dem Verschwinden der winterlichen Schneedecke in geringerem Maße vorhanden ist, als im Hochsommer.

Weil gegen den Rand und das Gletscherende die Geschwindigkeit des Eises rasch abnimmt, erhält in diesen Gebieten die Gletscheroberfläche größere Steilheit. Am Rand des grönländischen Binneneises zeigen sich häufig 40 bis 50 m hohe vertikale Wände an Stellen mit ganz geringer Eisbewegung. Hier sind die Strömungslinien fast horizontal, während die Abschmelzung bis zu fast 100 m Höhe ihren Betrag nicht ändert (vgl. Abschnitt 12).

In den Firnfeldern bewirken die durch Strahlung und Luftwärme erzeugten geringen Schmelzwassermengen besondere Formen der Gletscheroberfläche; Schmelzgangeln und Zackenfirn (Büßerschnee). Die letzteren Formen bizarrer Schmelzfiguren sind besonders in tropischen Firngebieten groß (bis zu 2 m Höhe) ausgebildet, finden sich aber auch in höheren Breiten.

Der Gletscherbach. Alles Wasser, das im Einzugsgebiet des Gletschers anfällt, oder durch Schmelzen des Eises erzeugt wird, fließt im Gletscherbach ab. Da die Schmelzung weitaus die größte Wassermenge liefert, gehen die Schwankungen in der Wasserführung des Gletscherbaches denen der Ablation ziemlich parallel. Die Wasserführung muß sich also mit der Tageszeit, mit der Jahreszeit und der Witterung ändern. Größere Messungsreihen über die Wassermenge der Gletscherbäche hat man von mehreren Stellen der Ostalpen, vor allem aber von einer Anzahl von Schweizer Bächen. Dem Sinne nach sind die Ergebnisse allerorts die gleichen, wenn auch die Beträge der Wassermengen für die einzelnen Bäche sehr verschieden sind wegen der ungleich großen Einzugsgebiete. Während der Wintermonate Januar, Februar, März betrug z. B. bei der Rhone in Gletsch die sekundliche Wassermenge (für 1900) 0,405 m³, sie stieg in den folgenden Monaten rasch an, erreichte im Juli mit 16,60 m³/sec den Höchstwert, hatte schon im Oktober nur mehr 2,1 m³/sec, um dann noch weiter, bis 0,60 m³/sec abzunehmen. Auch die Tagesschwankung ist nicht unbeträchtlich, etwa 14%; der höchste Wasserstand tritt im Laufe des Nachmittags ein, während morgens Niedrigwasser ist. Die Stunden des Eintritts der Extreme sind für Sommer und Winter nicht gleich, weil im Sommer das Wasser aus einem größeren Gebiet stammt, also einen weiteren Weg bis zum Pegel hat, als im Winter. Aus dem gleichen Grund verschiebt sich der Eintritt des höchsten Wasserstandes zeitlich mit der Ausdehnung verschiedener Gletschergebiete. Je größer ein Gletscher, je länger seine Zunge, um so später am Tag zeigt sich das Maximum der Wasserführung nahe am Gletscherende.

Der Umstand, daß die Gletscherbäche zur Sommerszeit am stärksten fließen, während andere Bäche und Flüsse wasserarm sind, macht sie zu einer Art Regulatoren der Wasserführung großer Flüsse und deshalb kommt ihnen für die Wasserwirtschaft der Gebirgsländer große Bedeutung zu.

Kleine Gletscher sind im Winter an den Boden angefroren (wenigstens im Randgebiet) und liefern kein Wasser. Bei großen Gletschern, ebenso wie beim Inlandeis in Grönland, fließen die Gletscherbäche aber auch im Winter. Ihre Wassermenge stammt dann fast ausschließlich von der auf der Gletschersohle durch Bewegung und Erdwärme verursachten Schmelzung, das zeigt u. a. auch das Ergebnis ausgedehnter Winterwassermessungen, welche an 27 Schweizer Gletscherbächen vorgenommen wurden.

Die Temperatur des Gletscherbaches ist kurz nach dem Austritt aus dem Gletschertor etwas über 0° C, sie steigt wegen der Bewegung des Wassers und wegen der Luftwärme mit wachsender Entfernung vom Gletscherende.

Eisberge. Gletscher, welche ins Meer, oder in große Seen endigen, erfahren außer durch die Ablation auch noch einen Substanzverlust durch das Abbrechen ihrer am weitesten ins Wasser vorgeschobenen Teile. Die Bruchstücke fallen ins Wasser und treiben mit dessen Strömungen als Eisberge fort. Zerklüftung, wie sie durch die Bewegung im Gletscher hervorgerufen wurde, die Abbruchflächen, Abschmelzung in der Luft, die Einwirkung des salzigen Meerwassers durch Brandung, Schmelzung und Lösung vereinigen sich um den wandernden Eisbergen die verschiedenartigsten Gestalten zu geben. Erleiden sie einseitig größere Massenverluste, so müssen sie neue Gleichgewichtslagen annehmen; dann steigen Teile, die längere Zeit unter Wasser waren, über dessen Oberfläche empor und zeigen die durch die Schmelzwirkung des Wassers erzeugten Hohlkehlen, die manchmal reihenweise übereinander, annähernd horizontal verlaufen.

Der Abbruch, das „Kalben" des Gletschers, kann entlang einer Fläche erfolgen, die nur

Digitized by Google

einen Bruchteil vom Querschnitt der Gletscherzunge ausmacht. Geht die Bruchfläche durch den ganzen Querschnitt, und hat das Bruchstück in der Länge größere Ausdehnung als in der Tiefe, so entsteht ein großer Tafeleisberg. Solche zeigen sich vielfach in der Umgebung des Randes der großen Eiskappe, welche den Südpolarkontinent überlagert. Kleinere Eisberge werden beim Abbruch und Sturz ins Wasser wälzende Bewegungen ausführen, durch welche es eintreten kann, daß die schutthaltigen Eispartien der Gletschersohle die oberste Stelle des schwimmenden Berges bilden und über Wasser liegen. In allen Fällen erkennt man die Spuren der Schichtung an den Eisbergen, so daß diese außer durch ihre Form, auch durch ihre Struktur von dem im Meerwasser gebildeten Eis unterschieden werden können.

Das Volumen des unter dem Meerwasser befindlichen Teiles eines Eisberges ist etwa siebenmal so groß, als jenes des über das Wasser aufsteigenden. Da die Höhe großer, flacher Eisberge über Wasser bis zu 70 m betragen kann, so darf auf eine Dicke von 500 bis 600 m geschlossen werden, welche die Ausläufer des grönländischen Inlandeises in den Fjorden besitzen, in denen sie dem Meere zuströmen. Daraus folgt, daß die Mächtigkeit des Inlandeises im allgemeinen kleiner als 600 m sein wird, weil gegen die Fjorde hin ein Zusammenpressen der Eismasse eintreten muß. Da die im Wasser frei schwebende Eismasse des Gletscherendes keine Reibung an Rändern und Sohle erfährt, während die noch auf festem Land aufliegende Gletschermasse durch die Reibung gehemmt wird, treten an der Uebergangsstelle Spannungen auf, deren Resultat Spaltenbildung an Grundfläche und Rändern des ausragenden Eisbalkens ist. Auftrieb und Gewicht desselben führen in wechselnder Wirkung seine Trennung vom Gletscher, eine große Kalbung, herbei. Da selbst bei bedeutender Geschwindigkeit des Eises 30 bis 40 Tage nötig sind, damit eine Eismasse vorgeschoben wird, deren Länge größer als ihre Dicke ist, erklärt sich das seltene Eintreten solch großer Kalbungen bei den grönländischen Gletschern leicht. In der Antarktis, wo das Eis nicht durch Fjorde sondern in sehr breitem Fladen zum Meere kommt, ist dessen Dicke geringer, daher auch die Zahl der tafelförmigen Eisberge größer. Manche der antarktischen Eisberge bleiben auf dem der eigentlichen Küste vorgelagerten Schelf liegen. Zwischen ihnen, in ihren Spalten und auf ihrer Oberfläche anfallender Schnee, der an vielen Stellen Meerwasser ansaugen kann, bildet neues Eis, so daß das S c h e l f e i s ein Gemisch von Wassereis, Schnee und geschichtetem Material der Eisberge darstellt.

15. **Gletscherschwankungen.** Ernährung und Abschmelzung eines Gletschers sind allen klimatischen Aenderungen unterworfen; daher werden sowohl seine Größe, als auch die in seiner Masse herrschenden Bewegungen ähnliche Schwankungen zeigen, wie sie dem Klima seines Gebietes zukommen. In der Tat ergaben die Beobachtungen, welche sich stellenweise auf sehr lange Zeiträume erstrecken, daß die Lage der Gletscherenden sich mit der Zeit bedeutend ändert, daß auf Perioden, während welcher die Gletscher weit ins Tal oder auf das Gebirgsvorland geschoben werden (Vorstoß), Schwindperioden folgen, während deren die Gletscherenden immer höher gelegt werden (Rückgang).

Schneereiche Winter und kühle Sommer, in denen die Abschmelzung geringere Substanzminderung der Gletscherzunge hervorbringt, wirken im gleichen Sinne; sie bewirken eine absolute bezw. gegenüber dem Mittelzustande eine relative Vermehrung der Gletschermasse, steigern die Geschwindigkeit der Eisbewegung und vermehren (nach einiger Zeit) die im Abschmelzgebiet liegende Eismasse; der Gletscher rückt vor und zwar um so beträchtlicher, je größer die Niederschlagsmehrung im Firn und je günstiger die Abflußbedingungen für das Eis sind. Wo ausgedehnte steile Mulden den Firn sammeln, um ihn durch enge Talquerschnitte in die Tiefe zu senden, wird sich ein solcher Vorstoß durch eine starke Verlängerung der Zunge bemerklich machen; wo beim Uebergang aus dem Sammelbecken ins Tal eine geringe Querschnittsänderung eintritt und auch die Neigung des Gletscherbettes eine kleine ist, da wird im allgemeinen ein Vorstoß weniger leicht zu beobachten sein. Nur bei sorgfältiger Messung der Lage des Randes und der Geschwindigkeit können in solchen Fällen Schwankungen des Gletscherstandes festgestellt werden. Neben dem Einfluß des Klimas auf die Lage des Gletscherrandes, zeigt sich also noch ein Einfluß der orographischen Verhältnisse des Gletscherbettes. Diese sind für benachbarte Gletscher sehr verschieden und daher kommt es, daß die Gletscher einer und derselben Gebirgsgruppe, für welche das Klima als gleichartig angesehen werden darf, vor allem die kleineren Vorstöße zu verschiedenen Zeiten beginnen. Nur wenn eine Reihe niederschlagsreicher Winter und kühler Sommer aufeinander folgen, tritt das Wachsen der Gletscher für ein großes Gebiet, wie etwa für die Alpen, annähernd gleichzeitig ein.

Der V e r l a u f e i n e s V o r s t o ß e s konnte am Vernagtferner im Oetztal verfolgt werden (1897 bis 1902). Es trat von 1889 an eine anfangs (bis 1893) kleine, dann rasch zunehmende Steigerung der Geschwindigkeit des Eises ein, welche 1899 auf den

17-fachen Betrag angewachsen war, den sie 1889 hatte. Dann folgte eine rapide Abnahme, so daß schon 1903 nur noch etwa ein fünftel der Maximalgeschwindigkeit herrschte. Von 1897 bis 1899 schwoll das Ende der Gletscherzunge bedeutend an und rückte gegen das Tal vor, so daß 1902 der Maximalstand erreicht war — 3 Jahre nachdem im Meßprofil die Geschwindigkeit den Höchstwert hatte. Die Anschwellung des Gletscherendes rückte schneller vor, als der aus dem Firnfeld kommende Massenzuwachs, sie war bis 1898 mit 240 m/Jahr gewandert, während im Meßprofil erst 177 m/Jahr als Geschwindigkeit bestand.

Aehnlich, wenn auch nicht so genau, ist der Verlauf des Vorstoßes noch an einigen anderen Gletschern beobachtet. Im Verlauf der Schwindperiode, die vorzüglich am Rhonegletscher verfolgt wurde, zeigt sich anfangs, unmittelbar nach dem Vorstoß, eine rasche Abnahme an Substanz und Areal des Gletschers. Späterhin wird die Abnahme um so kleiner, je kleiner das Gebiet der Zunge ist und je höher deren Ende liegt.

Die Größe der Flächen- und Massenschwankungen sind für einzelne Gletscher sehr verschieden. Für die näher untersuchten Alpengletscher betrug bis 1904 der Flächenverlust in der letzten Rückzugsperiode 8 bis 10% des Areals, der Substanzverlust im Durchschnitt stark von einander abweichender Werte etwa 25 Kubikmeter pro Quadratmeter Firn.

Die Dauer einer ganzen Schwankung ist für die einzelnen Alpengletscher ziemlich verschieden. Als Mittel aus ziemlich weit auseinander liegenden Einzelwerten ergab sich annähernd 35 Jahre. Für andere Gletschergebiete sind die Beobachtungen besonders aus älterer Zeit weniger reichlich, als für die Alpen. Doch ist jetzt für die Eisregionen der ganzen Erde festgestellt, daß ihre Gletscher periodischen Größenänderungen unterworfen sind. Die Dauer der Periode wurde aber bisher noch nicht allgemeiner ermittelt. Wo dies geschah, wie für Norwegen, da zeigte sie sich von der der alpinen Periode verschieden. Man neigt zu der Annahme, daß die letztere, ebenso wie die etwa 19jährige skandinavische als kleinere Schwankungen einer säkularen Periode von noch unbekannter Dauer untergeordnet sind.

Die geringe Uebereinstimmung in der Dauer einer Schwankungsperiode, wie sie bisher für benachbarte Gletscher und für die verschiedenen Gletschergebiete der Erde gefunden wurde, zeigt deutlich, daß sich eine klimatische Periode, die ein größeres Gebiet betreffen muß, mit einer durch die orographischen Verhältnisse des Einzelgletschers gegebenen überlagert. Eine Trennung beider Komponenten konnte bisher noch nicht durchgeführt werden.

Außer den langperiodischen Aenderungen gibt es auch Schwankungen von kurzer Dauer. Da die Bewegung des Gletschers auch während des Winters andauert, während die Abschmelzung aufhört, wird im Winter ein kleiner Vorstoß des Gletscherendes, mindestens aber ein Stillstand des Rückganges eintreten. Auch in der Geschwindigkeit wurden durch besonders sorgfältige Messungen jahreszeitliche Schwankungen festgestellt. Am Hintereisgletscher ergibt für den Sommer die Geschwindigkeit nahe am Ende größere Werte, als für den Winter, während im Firn die Wintergeschwindigkeiten die größeren sind. Diese Messungen, sowie die Ergebnisse der Beobachtungen am Rhonegletscher stützen die Annahme, daß sich die Druckänderungen, welche die wechselnden Niederschlagsverhältnisse im Firn veranlassen, rasch durch die ganze Gletschermasse ausbreiten. Dies ist auf die Wassermengen zurückzuführen, die das Eis eingeschlossen hält.

In mehreren Fällen haben besondere Ereignisse, die mit den Schwankungen zusammenhängen, zu Gletscherkatastrophen geführt. Es handelt sich dabei um Abstürze großer Eismassen, Gletscherlawinen, die in den Tälern Verheerungen anrichteten und um Ausbrüche von Stauseen. Bei den Gletscherlawinen ist der Vorgang meist der, daß durch das Wachsen der Gletscherzunge für einen Querschnitt derselben eine Zugbelastung entsteht, der er nicht genügenden Widerstand leisten kann; es erfolgt Bruch und Abrutsch des unteren Zungenteiles (Eisrutsch am Altels, Lawinen des Biesgletschers — Zerstörungen von Randa im Visptal, Eissturz am Giétrozgletscher im Val de Bagnes u. a. m. in den Alpen, Lawinen des Devdorakgletschers im Kaukasus). Stauseen bilden sich, wenn das Eis eines vorschreitenden Gletschers den Abfluß eines benachbarten abdämmt. Dann bildet sich oberhalb des Eisdammes ein See, der so lange besteht, bis der Wasserdruck hinreicht, um den an einer Stelle (durch Abschmelzung) geschwächten Eisdamm zu durchbrechen. Mit einem Male ergießt sich dann eine verwüstende Flutwelle talwärts (Rofensee im Vernagtgebiet, Mattmarksee im Saaser Tal, Märjelensee am Aletschgletscher u. a.). Die Nachrichten über solche Katastrophen sind die einzigen, aus denen auf Gletschervorstöße in früheren Jahrhunderten geschlossen werden kann.

Literatur. **A. Heim**, *Handbuch der Gletscherkunde. Stuttgart 1885.* — **H. Hess**, *Die Gletscher. Braunschweig 1904.* — **H. Barnes**, *Iceformation. New York 1906.* — **W. H. Hobbs**, *Characteristics of existing Glaciers. New York 1911.* — **R. S. Tarr**, *The Yakutat Bay Region, Alaska*

Digitized by Google

Washington 1909. — **Svenonius u. A.**, *Die Gletscher Schwedens. Stockholm 1908.* — **H. Hess**, *Ueber die Plastizität des Eises. Annalen der Physik 1911.* — **E. Riecke**, *Zur Erniedrigung des Schmelzpunktes durch einseitigen Druck oder Zug. Zentralbl. f. Min., Geol. u. Paläontol. 1912.* — **V. Paschinger**, *Die Schneegrenze in verschiedenen Klimaten. Gotha 1912.* — *Zeitschrift für Gletscherkunde Bd. I—VI.* — *Wissenschaftliche Berichte der Südpolarexpeditionen vom Anfang des Jahrhunderts.* **Koch und Wegener**, *Die glaciologischen Beobachtungen der Danmark-Expedition. Kopenhagen 1911.*

H. Hess.

Eisengruppe.

a) Eisen. b) Kobalt. c) Nickel.

Die Eisengruppe umfaßt die Metalle Eisen, Nickel, Kobalt und bildet im periodischen System die erste Triade der letzten Vertikalkolumne. Im Gegensatz zu den Platinmetallen besitzen diese Metalle eine Elektroaffinität, die etwas größer als die des Wasserstoffs ist. In ihren Atomgewichten unterscheiden sie sich nur wenig, die Atomvolumina sind fast identisch. Die Fähigkeit, gefärbte Salze und in Lösung gefärbte Ionen zu bilden, tritt bei ihnen allen charakteristisch hervor. Die Gruppe stellt die einzigen stark magnetischen Metalle vor. Obwohl, dem Atomgewicht entsprechend, dem Eisen das Nickel und diesem das Kobalt folgt, ordnen sie sich, ihrem chemischen und physikalischen Charakter nach, in der Reihenfolge Fe, Co, Ni dem periodischen System ein. Die Fähigkeit, drei Valenzen zur Verfügung zu stellen, die für das Eisen charakteristisch ist, ist dem Nickel ganz verloren gegangen, während das Kobalt, namentlich in seiner Komplexchemie, noch dazu befähigt ist. Auch der Schmelzpunkt sinkt in der Reihenfolge Fe, Co, Ni, ebenso die Magnetisierbarkeit.

a) Eisen.

Ferrum. Fe. Atomgewicht 55,84.

1. Atomgewicht. 2. Vorkommen. 3. Geschichte. 4. Darstellung. 5. Formarten und physikalische Konstanten. 6. Valenz und Elektrochemie. 7. Analytische Chemie. 8. Spezielle Chemie. 9. Thermochemie. 10. Kolloidchemie. 11. Spektralchemie.

1. Atomgewicht. Für das Atomgewicht des Eisens ist von der internationalen Kommission in die Tabelle für das Jahr 1912 der Wert 55,84 aufgenommen worden.

2. Vorkommen. Das Eisen kommt in gediegenem Zustande vereinzelt als Meteoreisen in Grönland, Sibirien und Mexiko vor. Eisenverbindungen, namentlich im Verein mit Sauerstoff und Schwefel, sind dagegen äußerst zahlreich und bilden zum Teil mächtige Erzlager. Die für die industrielle Verwertung wichtigen Eisenmaterialien sind das Brauneisenerz ($2Fe_2O_3.3H_2O$), der Spateisenstein ($FeCO_3$), der Roteisenstein (Fe_2O_3) und der Magneteisenstein (Fe_3O_4). Von den Schwefelmineralien ist das wichtigste der Pyrit (FeS_2), auch Eisenkies oder Schwefelkies genannt, der vor allem in der Schwefelsäurefabrikation zur Herstellung von Schwefeldioxyd eine Rolle spielt. Wahrscheinlich durch Oxydation des Eisenkieses entstanden, finden sich Eisenvitriole im Mineralreich. Weitere wichtige Erze sind der Kupferkies (Fe_2S_3, Cu_2S), das Buntkupfererz (Fe_2S_3, $3Cu_2S$) und der Arsenkies ($FeAsS$). Alle natürlichen Wässer besitzen ferner einen mehr oder minder großen Gehalt an Eisen. Auch in der organischen Natur ist das Eisen verbreitet. Es gehört zu den wesentlichen Bestandteilen des Blutfarbstoffes, des Hämoglobins. Im reinen Chlorophyll dagegen kommt Eisen nicht vor.

3. Geschichte. Die Nutzbarmachung des Eisens durch die Menschheit reicht, obwohl es erst nach dem Kupfer und der Bronze entdeckt wurde, bis in die ältesten Zeiten zurück, und man findet es schon bei den Aegyptern vor 5000 Jahren vornehmlich zur Anfertigung harter Gegenstände im Gebrauch. Die verarbeiteten Erze waren offenbar Brauneisenstein und Magneteisenstein, die in Schmelzöfen reduziert wurden. Von den schon damals erkannten Eigenschaften sind besonders die Brüchigkeit und die Fähigkeit, durch Berührung mit Magneteisenstein zeitweilig magnetisch zu werden, hervorzuheben. Späterhin, bis zum Beginn der Neuzeit, ist das Eisen in kleinen „Stücköfen" direkt als Schmiedeeisen in ungeschmolzenem Zustande hergestellt worden, bis durch Benutzung der Wasserkräfte und die dadurch ermöglichte Verstärkung der Gebläse im „Hochofen" das geschmolzene kohlenstoffreiche Eisen erhalten wurde. Mit dem Beginn des 19. Jahrhunderts setzte mit der Erfindung der Dampfmaschine und dem mächtigen Anwachsen der Maschinenindustrie das „eiserne Zeitalter" ein. Der Hochofenprozeß wurde durch eingehende Untersuchungen aufgeklärt, wobei die aufblühende chemische Analyse, welche schon die schädlichen Begleiter des Eisens kennen und bestimmen gelehrt hatte, bei der Untersuchung der Hochofengichtgase zum Verständnis des Prozesses wichtige Dienste leistete. Durch die Erkenntnis der Rolle des Kohlenstoffs im Eisen, wodurch die Beziehungen und Eigenschaften der einzelnen Eisensorten aufgeklärt wurden, und durch zahllose andere Arbeiten wissenschaftlicher und technischer Natur ist die Eisenindustrie

Digitized by Google

heute zum wichtigsten Faktor in der Weltindustrie geworden.

4. Darstellung. 4a) Gußeisen. Während sulfidische Erze den Ausgangspunkt für die Darstellung vieler praktisch wichtiger Metalle, wie Kupfer, Zink, Blei und Quecksilber, bilden, benutzt man zur Darstellung des Eisens seine Oxydverbindungen. Der Reduktionsprozeß vollzieht sich gegenwärtig im sogenannten Hochofen, einem Schacht von Doppelkegelform, in welchem die zuvor schwach gerösteten Oxyde abwechselnd mit Schichten von Kohle und schlackenbildenden Zusätzen von oben, von der Gicht her, eingeführt werden. Als Brennmaterial verwendet man Koks, Holzkohle und Anthrazit, als Zusatz benutzt man Kalkstein oder Ton und Feldspat je nach der anwesenden Gangart. In dem unteren Teil, den Formen, befinden sich die Zuführungen für die aus den Gebläsen eintretende heiße Luft, die den Kohlenstoff, da es sich um Temperaturen von ungefähr 1100° handelt, zu fast reinem Kohlenmonoxyd verbrennt (s. unten). Dieses reduziert die Oxyde zu Metall. Den unteren Abschluß des Hochofens bildet der sogenannte Herd, wo sich das flüssige Roheisen und darüber die flüssige Schlacke absetzt. Die letztere pflegt kontinuierlich abzufließen, während das Roheisen von Zeit zu Zeit abgestochen wird. Der Betrieb im Hochofen ist ein ununterbrochener. In dem Maße, wie der Prozeß fortschreitet, führt man durch die Gicht neues Material zu, so daß ein solcher Ofen jahrelang im Betrieb sein kann.

Die sich abspielenden Prozesse sind recht komplizierter Natur und wechseln mit der Temperatur. Da die kohlenoxydhaltigen Gase den Ofen von unten nach oben durchströmen, also ein Temperaturgefälle durchmachen, hat man es in den verschiedenen Wärmezonen auch mit verschiedenen Vorgängen zu tun. Im obersten Teil (400 bis 600°) findet nur ein Trocknen des Materials statt. Beim Heruntersinken in die heißeren Teile (700°) beginnt die Reduktion von Eisen(III)-oxyd zu Fe_3O_4. Weiterhin erfolgt Reduktion von Fe_3O_4 zu FeO und schließlich Reduktion zu Metall. Durch Einwirkung von Kohle auf Metall findet „Zementation", Bildung von Eisen-Zementit (Fe_3C)-Legierung, statt, und in den heißesten Teilen, wenig oberhalb der Formen, tritt Schmelzen des kohlenstoffhaltigen Eisens ein. Der Zementationsprozeß ist wegen der Herabsetzung des Schmelzpunktes ein wichtiges Glied im Hochofenprozeß, da durch die niedriger liegende Temperatur das Ofenmaterial geschont wird. Die beiden wesentlichen Reaktionen, die sich im Ofen abspielen, werden durch die umkehrbaren Gleichungen ausgedrückt:

$$FeO + CO \rightleftarrows CO_2 + Fe \qquad (a)$$
$$CO_2 + C \rightleftarrows CO \qquad (b)$$

Da bei den Temperaturen (über 700°) und Drucken des Hochofens die CO-Konzentration, die dem Gleichgewicht (b) entspricht, größer ist als die des Systems (a), so ergibt die Theorie, daß das CO-CO_2-Gemisch immer reduktionskräftig bleibt. Praktisch aber kommt es nicht einmal so weit, das Gasgemisch ist bei der großen Geschwindigkeit des Durchströmens immer reicher an CO als der Theorie entspricht, das Gleichgewicht kommt nicht zur Einstellung.

Die mittlere Zusammensetzung der Hochofengase beträgt ungefähr: Stickstoff: 54 bis 66%, CO_2: 7 bis 19%, CO: 21 bis 31%, Wasserstoff: 1 bis 6%, Kohlenwasserstoffe: 0 bis 6%. Man hat nun lange geglaubt, das entweichende CO durch vollständige Verbrennung besser auszunutzen, wenn die Dimensionen der Hochöfen möglichst große wären, d. h. die Berührung von CO und FeO intensiver gestaltet würde. Eine einfache Ueberlegung auf der Basis des Massenwirkungsgesetzes lehrt jedoch, daß hiermit nur wenig geändert wird. Denn in dem Gleichgewicht (a) ist das Verhältnis $\frac{CO}{CO_2}$ allein eine Funktion der Temperatur und zwar ist die Aenderung gering, weil bei dem Reduktionsprozeß nur wenig Wärme entwickelt wird. Das Verhältnis $\frac{CO}{CO_2}$ ist dagegen völlig unabhängig vom Druck bezw. der Konzentration, ferner unabhängig von der absoluten Menge des vorhandenen Eisens und Eisenoxyds. Es ist also die den Hochöfen entweichende Menge Kohlenoxyd für die gegebene Temperatur unveränderlich. Vgl. auch den Artikel „Chemisches Gleichgewicht".

Man nutzt demgemäß heutzutage die Gase derart aus, daß man sie entweder verbrennt und den Gebläsewind damit vorwärmt, oder aber noch vorteilhafter, indem man sie nach genügender Reinigung mit Luft gemischt in Gaskraftmaschinen verpuffen läßt. Derartige Hochofengasmotoren spielen im heutigen Wirtschaftsleben eine sehr große Rolle.

Das durch den Hochofen gewonnene Eisen ist niemals rein, sondern stellt ein Produkt dar, das durch Kohlenstoff (3 bis 4,5%), ferner durch Silicium, Mangan, Phosphor und Schwefel verunreinigt ist. Ueber den Einfluß dieser Elemente auf die verschiedenen Eisensorten siehe den Abschnitt 5.

4b) Schmiedeeisen. Der größte Teil des produzierten Roheisens wird durch Oxydationsverfahren in schmiedbares Eisen (Schweiß- oder Flußeisen) verwandelt, welches im Gegensatz zum Gußeisen nur einen

Digitized by Google

Kohlenstoffgehalt von 0,1 bis 0,2% enthält. Die üblichen Oxydationsprozesse sind das Herdfrischen und der Puddelprozeß. Bei beiden Verfahren wird unter der Einwirkung von Sauerstoff der Kohlenstoff zu Kohlenoxyd, das Silicium und der Phosphor zu Kieselsäure und Phosphorsäure oxydiert. Kohlenoxyd entweicht oder verbrennt, die Säuren werden verschlackt.

4c) Stahl. Unter Stahl verstand man früher ein Eisen, das 0,2 bis 0,5% Kohlenstoff enthält, jedoch zählt man heutzutage auch Eisensorten mit weniger als 0,2%, die weichen Stahle, zu dieser Kategorie. Vom Roheisen ausgehend, findet der saure Bessemer-Prozeß, der Thomas-Gilchrist-Prozeß (basischer Bessemer-Prozeß), der Siemens-Martin-Prozeß, ferner der Tiegelstahlprozeß Anwendung. Beim sauren Bessemerprozeß wird durch das in einem birnenförmigen Behälter befindliche geschmolzene Roheisen unter Druck Luft eingepreßt und durch den Sauerstoff der Reihe nach, entsprechend ihrer Affinität zum Sauerstoff, Silicium, Kohlenstoff und Mangan verbrannt. Die durch die Oxydation erzeugte Wärme genügt hierbei, die Masse bis über den Schmelzpunkt des sich zuerst bildenden Schmiedeeisens zu erhitzen. Durch Zusatz von Gußeisen, Schmiedeeisen oder Holzkohle kann man dem Stahl den gewünschten Kohlenstoffgehalt erteilen. Durch Kippen wird die Birne entleert.

Bei diesem Prozeß gelingt es jedoch nicht, dem Roheisen den namentlich in deutschen Erzen vorkommenden schädlichen Gehalt an Phosphor zu entziehen. Der Thomas-Gilchrist-Prozeß hat hier Abhilfe geschaffen. Durch Ausfütterung der Bessemerbirne mit basischem Futter, mit Kalk oder gebranntem Dolomit, wird das entstandene Phosphorpentoxyd unter Bildung von Calciumphosphat verschlackt, nach beendetem Prozeß die Schlacke abgezogen und das Metall ausgegossen. Die Schlacke bildet hierbei ein wegen des Phosphorgehalts wertvolles Nebenprodukt, das gepulvert als Düngemittel (Thomasmehl) der Landwirtschaft zugeführt wird.

Der Siemens-Martin-Prozeß findet namentlich Verwendung zur Herstellung feiner Eisensorten, da der Prozeß bequem kontrolliert werden kann und leicht Produkte bestimmter Zusammensetzung liefert. Die Rohmaterialien, meistens Alteisenabfälle und Roheisen, werden unter Zusatz kleiner Mengen reiner Eisenerze, auf dem Herd eines Siemens-Flammofens entkohlt, je nach der Beimengung auf basischer oder saurer Sohle; nach beendeter Entkohlung werden Zuschläge von Spiegeleisen, Eisenmangan, Nickel, Chrom usw. je nach dem zu produzierenden Eisen zugesetzt.

Stahle von außergewöhnlicher Qualität werden in großem Maßstabe nach dem Tiegelstahlprozeß hergestellt, bei welchem durch Abstehen des Stahls, d. h. völlige Ausscheidung von Schlackenmaterialien und Gasen, ferner Zerstörung gebildeten Eisenoxyduls durch Silicium, ein hervorragendes Material erzeugt wird. Tiegelstahl wird ebenfalls vielfach durch Mischen mit Nickel, Chrom, Wolfram, Molybdän usw. auf Spezialstähle verarbeitet.

Auch die Elektrometallurgie des Eisens hat seit dem Jahre 1898, namentlich durch die Bemühungen von Stassano und Héroult bedeutende Fortschritte gemacht, so daß heutzutage bereits eine größere Anzahl von Werken in Europa und in Amerika an Orten mit Wasserkräften für die Gewinnung von Roheisen und Stahl im elektrischen Ofen in Betrieb gesetzt sind.

4d) Chemisch reines Eisen. Alles technisch dargestellte Eisen besitzt eine mehr oder minder große Verunreinigung durch Fremdstoffe. Um chemisch reines Eisen zu gewinnen, reduziert man reines Eisenoxyd, Eisen(II)chlorid oder Oxalat im Wasserstoffstrom möglichst über 450°, da bei tieferen Temperaturen pyrophorisches Eisen entsteht.

5. **Formarten, Legierungen und physikalische Konstanten.** Chemisch reines Eisen ist ein silberweißes, dem Platin ähnliches Metall, von größerer Weichheit und Dehnbarkeit als das Schmiedeeisen. Es besitzt ein spezifisches Gewicht von 7,84 und schmilzt bei 1505°. Ausgezeichnet ist es durch das Vorkommen in drei allotropen Modifikationen, die alle regulär kristallisieren. Man kennt das α-Eisen oder den Ferrit, das β-Eisen und das γ-Eisen. Der erste Uebergang von $\gamma \rightleftarrows \beta$-Eisen liegt scharf bei 880°, der zweite von $\beta \rightleftarrows \alpha$-Eisen vollzieht sich infolge auftretender Mischkristallbildung in einem Temperaturvall bei ca. 780°, wie man auf der Kurve für die Abkühlungsgeschwindigkeit von auf ca. 1000° erhitztem Metall aus den auftretenden Haltepunkten leicht erkennen kann. Die Umwandlung von γ- in β-Eisen ist dabei mit einer Volumvermehrung verknüpft, bei der weiteren Umwandlung in α-Eisen entsteht dagegen ein dichteres Produkt. Der charakteristische Unterschied des α-Eisens vom β- und γ-Eisen kommt außer in Verschiedenheiten in der elektrischen Leitfähigkeit, der spezifischen Wärme und dem spezifischen Gewicht, vor allem in seiner Magnetisierbarkeit zum Ausdruck. Nur das α-Eisen, also Eisen, wie es bei gewöhnlicher Temperatur vorliegt, besitzt magnetische Eigenschaften, jedoch vermag die Anwesenheit von Kohlenstoff oder von Metallen wie Chrom, Wolfram, Nickel und Mangan eigenartige Aenderungen hervorzurufen. Durch Zusätze der eben genannten

Digitized by Google

Art können nämlich die Umwandlungstemperaturen in verschiedenem Maße sinken bezw. die Umwandlungen selbst verzögert werden, so daß z. B. ein Stahl, der mit 0,27% Nickel einen magnetischen Umwandlungspunkt bei 715° besitzt, bei einem Gehalt von 26% Nickel einen Umwandlungspunkt erst unterhalb 0° besitzt. Ein solcher Stahl erscheint also bei gewöhnlicher Temperatur unmagnetisch, trotzdem er normalerweise magnetisierbares α-Eisen enthalten sollte, und es bedarf starker Abkühlung, um die Umwandlung in Ferrit herbeizuführen.

Ein weiterer charakteristischer Unterschied der drei Modifikationen liegt in der verschiedenen Löslichkeit für Kohlenstoff und Eisencarbid. Hier ist das γ-Eisen die bevorzugte Modifikation mit dem größten Lösungsvermögen. Auch das β-Eisen besitzt eine beschränkte Löslichkeit, während dieselbe dem α-Eisen völlig abgeht. Da die Menge und die Art der Lösung des im Eisen befindlichen Kohlenstoffs die größte Bedeutung für die verschiedenen Eisensorten besitzt, sei an dieser Stelle eine kurze Besprechung der vorkommenden Eisenkohlenstofflegierungen eingeschaltet.

Eisen und Kohlenstoff können sich unter Carbidbildung vereinigen. Das entstandene Produkt, von der chemischen Zusammensetzung Fe_3C, führt als Strukturelement den Namen Zementit und ist von beträchtlicher Härte (6 nach der Mohsschen Skala). Am einfachsten erfolgt die Bildung durch Auflösen von Kohlenstoff in flüssigem Eisen, wobei man im Schmelzfluß wohl ein Gleichgewicht zwischen Eisen, Kohlenstoff und Carbid annehmen kann. Je nachdem man nun die Schmelze langsam oder rasch erstarren läßt, findet Abscheidung des Kohlenstoffs vorwiegend in elementarer Form oder infolge Unterkühlung als Carbid statt. Dasselbe bildet im letzten Falle eine feste Lösung in γ-Eisen und führt als solche den Namen Martensit. Zunächst mögen die Erstarrungserscheinungen bei schnellerer Abkühlung besprochen werden. Läßt man eine kohlenstoffreiche Schmelze derart erkalten, so scheidet sich zunächst ein Teil des Kohlenstoffs als Zementit ab und die Abscheidungstemperatur sinkt auf 1130°, wo die Schmelze zu einem eutektischen Gemisch von Martensit-Zementit mit einem C-Gehalt von 4,2% erstarrt. Ist der Kohlenstoffgehalt in der Schmelze geringer als dieser eutektischen Mischung entspricht (2 bis 4,3% C), so scheiden sich zunächst Mischkristalle aus, die weniger C enthalten, als die Schmelze. Dadurch steigt der C-Gehalt derselben, bis wieder die eutektische Zusammensetzung erreicht ist. Man hat schließlich Eutektikum und gesättigte Mischkristalle mit 2% C. Sind in der Schmelze weniger als 2% C enthalten, so sind die Mischkristalle kohlenstoffärmer. Mit der Erstarrung sind aber die Umwandlungserscheinungen noch nicht beendet. Durch plötzliches Abkühlen in Eiswasser auf Zimmertemperatur kann man zwar die eben geschilderten Zustände fixieren. Läßt man jedoch einem derartig erstarrten Produkt Zeit zur Abkühlung, so daß sich jederzeit das wahre Gleichgewicht einstellen kann, so beginnt zunächst infolge der abnehmenden Löslichkeit eine Abscheidung von Zementit aus den Mischkristallen, bis bei 710° die Beständigkeit der festen Lösung überhaupt aufhört und sie vollständig in ein Gemisch von Eisen und Zementitkristallen (wegen seines perlmutterartigen Aussehens Perlit genannt) zerfällt. Näheres siehe im Artikel „Legierungen".

Aus diesen Betrachtungen geht hervor, daß bei rascher Abkühlung der in der Schmelze gelöste Kohlenstoff chemisch gebunden bleibt und daß man vornehmlich den harten Martensit in den Produkten behält. Verläuft die Abkühlung allmählich, so sind zunächst die Bedingungen zur Kohleabscheidung, in Form von Graphit und amorpher Kohle (Temperkohle) gegeben, da der zeitliche Zerfall: $Fe_3C \rightleftarrows$ Graphit + Schmelze, zum Teil stattfinden kann. Außerdem liefert der Zerfall des Martensits in Perlit ein Eisen von nur mittlerer Härte.

Unter diesen Gesichtspunkten betrachtet, wird der Unterschied zwischen den verschiedenen Roheisensorten (2 bis 5,1% C) verständlich. Gußeisen, durch plötzliche Abschreckung hergestellt, enthält den Kohlenstoff als Zementit in fester Lösung und bildet das spröde harte, weiße Gußeisen. Langsam abgekühltes, also graphithaltiges Roheisen ist das weiche graue Gußeisen. Ein Mangangehalt wirkt der Graphitabscheidung entgegen, derartiges Roheisen sieht also meistens weiß aus. Ein 5 bis 20% Mangan enthaltendes Eisen kristallisiert in großen Blättern und führt den Namen Spiegeleisen. Gußeisen erweicht nicht unterhalb seines Schmelzpunktes, der je nach der Zusammensetzung zwischen 1100 und 1250° liegt. Es ist also nicht schmiedbar. Sehr kleine Phosphormengen (0,1%) machen das Metall in der Kälte brüchig. Schwefelbeimengungen machen es in der Wärme brüchig.

Auch für die verschiedenen Stahlsorten finden die Betrachtungen über Eisenkohlenstofflegierungen Anwendung. Langsam erkalteter Stahl ist verhältnismäßig weich, abgeschreckter, martensithaltiger Stahl ist umgekehrt hart. Durch mäßiges Erhitzen (Tempern) kann die Härte des Stahls beliebig geändert werden (Anlassen des Stahls), da hierbei ein merklicher Zerfall von Martensit in Ferrit und Eisencarbid stattfinden kann. Aus den sogenannten Anlauffarben, die aus

Digitized by Google

dünnen Oxydhäutchen bestehen, kann der Grad des Anlassens beurteilt werden. Der Stahl ist im Gegensatz zum Schmiedeeisen ein elastisches Metall und besitzt große Zähigkeit. Die Zerreißungsfestigkeit beträgt bis zu 100 kg pro qcm. Ein Kohlenstoffgehalt von über 1 % und allzu starkes Härten nimmt dem Metall diese hervorragenden Eigenschaften. Stahl kann im Gegensatz zu reinem Eise und Schmiedeeisen dauernd magnetisch gemacht werden. Ueber den Einfluß der Zusätze zum Eisen, wie Chrom, Mangan, Wolfram, Vanadin, Nickel, Molybdän, die alle bei den sogenannten Spezialstählen eine große Rolle spielen, sei nur gesagt, daß ihre Wirkung in einer Aenderung der Beständigkeit des Zementits, oder, wie bereits erwähnt, in einer Verschiebung der Umwandlungstemperaturen der allotropen Eisen-Modifikationen, ferner der eutektischen Punkte, also der Mischkristallfelder liegt. Nickelstahle (2 bis 8 %) zeichnen sich durch eine Zähigkeit aus, die doppelt so groß wie die des gewöhnlichen Stahls ist. Man braucht sie deshalb zur Darstellung von Panzerplatten. Chrom und Wolfram vermehren die Härte, ohne die Zähigkeit sehr herabzusetzen, auch wenn die Legierungen nicht abgeschreckt sind. Ein idealer Zusatz ist auch das Vanadin, welches die Zähigkeit in ganz hervorragendem Maße steigert.

Physikalische Konstanten:

Spezifisches Gewicht. Schmiedeeisen: 7,8; Gußeisen 7,1 bis 7,7; Eisendraht 7,7; Gußstahl 7,8.

Schmelzpunkt. Reines Metall (99,95 %): 1505°, Stahl: bis 1400°, Gußeisen: 1100 bis 1250°.

Ausdehnungskoeffizient. Reines Metall: 0,000011 bei 18°; zwischen 0 und 100°: 0,000012.

Spezifische Wärme. Reines Metall: 0,105 bei 18°; Stahl: 0,114 bei 18°.

Härte. Reines Metall: 4,5; Stahl 5 bis 8,5 nach Auerbachs Skala.

Elektrische Leitfähigkeit. Reines Metall: $13{,}1 \cdot 10^4$ bei 16°. Stahl (1 % C): $5{,}02 \cdot 10^4$ bei 18°; Gußeisen: $2{,}42 \cdot 10^4$ bei 20°.

6. Valenz und Elektrochemie. Das Eisen tritt in den Ferrosalzen (Eisen(II)-salzen) zweiwertig auf, wie aus Molekulargewichtsbestimmungen des Chlorids in Lösungen von $BiCl_3$ und Pyridin eindeutig hervorgeht, während die Dampfdichtebestimmungen erst bei 1300° die einfache Molekularformel $FeCl_2$ hervortreten lassen. Unterhalb dieser Temperatur, auch bei Gelbglut liegen die Werte noch zwischen $FeCl_2$ und Fe_2Cl_4. Ferner spricht die Isomorphie des Eisen(II)sulfats mit den zweiwertigen Kupfer-, Zink- und Magnesiumsulfaten deutlich für die Zweiwertigkeit.

In den Ferrisalzen (Eisen(III)-salzen) findet sich das Eisen in dreiwertiger Form vor. Zum Beweise können auch hier die Molekulargewichtbestimmungen des Chlorids in Pyridin, Alkohol und Aether dienen. Oberhalb 700° liefert auch die Dampfdichtebestimmung normale Werte. Eine weitere Bestätigung liegt in der Eigenschaft des Ferrisulfats Alaune zu bilden, wobei das dreiwertige Aluminium und Chrom durch Eisen ersetzt wird. Höherwertiges Eisen findet man in den Peroxyden FeO_2 und Fe_2O_5, ferner in den Salzen der Eisensäure, z. B. in Kaliumferrat, wo das Eisen wahrscheinlich sechswertig anzunehmen ist.

Entsprechend der Fähigkeit des Eisens in Salzform zwei- und dreiwertig aufzutreten, hat man es in der wässerigen Lösung von Eisensalzen mit zwei- und dreiwertigen Fe-Ionen zu tun. Die reinen Eisen(II)-salze, die in wasserfreiem Zustande weiße Farbe, in wasserhaltigem grünblaue Farbe besitzen, spalten in wässeriger Lösung die blaßgrün gefärbten $Fe^{\cdot\cdot}$-Ionen ab. Diese $Fe^{\cdot\cdot}$-Ionen sind ausgezeichnet durch eine ausgesprochene Neigung durch Oxydation in das dreiwertige $Fe^{\cdot\cdot\cdot}$-Ion überzugehen. Dieser Prozeß kann durch Chlor, Salpetersäure oder auch durch den Sauerstoff der Luft vor sich gehen, wobei in neutraler Lösung unlösliches, braungefärbtes basisches Salz ausfällt (a), bei Gegenwart von $H^{\cdot}$-Ionen, also in saurer Lösung, neutrales Oxydsalz entsteht (b).

a) $2Fe^{\cdot\cdot} + 4Cl' + \frac{1}{2}O_2 = Cl_2Fe{-}O{-}FeCl_2$.

b) $2Fe^{\cdot\cdot} + 6Cl' + \frac{1}{2}O_2 + 2H^{\cdot} = 2Fe^{\cdot\cdot\cdot} + 6Cl' + H_2O$.

Die Eisen(III)salze spalten in wässeriger Lösung das schwach gefärbte $Fe^{\cdot\cdot\cdot}$-Ion ab. Trotzdem erhält man beim Lösen von Ferrisalzen meist braun gefärbte Lösungen, eine Erscheinung, die ihre Erklärung in der leichten hydrolytischen Spaltbarkeit der Eisen(III)salze findet. $Fe^{\cdot\cdot\cdot} + 3H_2O \rightleftarrows Fe(OH)_3 + 3H^{\cdot}$. Das abgespaltene Hydroxyd bleibt hierbei, falls die Hydrolyse nicht allzu stark in Kraft tritt, kolloidal in Lösung. Starke Säuren, z. B. Salpetersäure, drängen die Hydrolyse durch Verminderung der OH'-Ionen zurück, wie aus der Farbänderung zu sehen ist. Umgekehrt bewirken Salze einer schwachen Säure, wie das Natriumacetat, infolge Bindung der $H^{\cdot}$-Ionen starke hydrolytische Spaltung.

Eisen(II)hydroxyd ist im Gegensatz zum Eisen(III)hydroxyd eine relativ starke Base, infolgedessen sind die Eisen(II)salze auch nur mäßig hydrolysiert.

Die schwache Basizität des Ferrihydroxyds kommt besonders klar dadurch zum Ausdruck, daß es im Gegensatz zum Ferrohydroxyd, wie das $Al(OH)_3$ und $Cr(OH)_3$ kein Carbonat zu bilden imstande ist. Ferrisalze besitzen stark reduzierenden Stoffen

Digitized by Google

gegenüber beträchtliches Oxydationsvermögen, denn die dritte Valenz des $Fe^{\cdot\cdot\cdot}$-Ions besitzt nur geringe Elektroaffinität, da die Umwandlung des $Fe^{\cdot\cdot}$ in das $Fe^{\cdot\cdot\cdot}$-Ion sich unter Energieverbrauch vollzieht. Schwefelwasserstoff wird z. B. leicht unter Schwefelabscheidung oxydiert: $2Fe^{\cdot\cdot\cdot} + S'' = 2Fe^{\cdot\cdot} + S$.

Der Wert des elektrolytischen Gleichgewichtpotentials Fe/1-n $Fe^{\cdot\cdot}$, entsprechend dem Vorgang $Fe \rightleftarrows Fe^{\cdot\cdot} + 2 \ominus$, beträgt $\varepsilon_h = -0{,}43$ Volt (Wasserstoffelektrode = 0). Jedoch erhält man diesen Wert nicht unmittelbar nach Einbringen des Eisens (geschmolzenes, reines Eisen) in die Ferrosulfatlösung. Vielmehr zeigt sich das gemessene Potential wahrscheinlich infolge der Langsamkeit, mit der der mögliche elektrolytische Lösungsdruck erreicht wird (vgl. auch den Artikel „Passivität"), um 0,1 und mehr Volt edler und erst nach längerer Zeit erhält man konstante Werte. Umgekehrt bekommt man ein viel unedleres Potential, wenn man elektrolytisch abgeschiedenes, also H_2-haltiges Eisen, besonders wenn es noch eine Zeitlang kathodisch polarisiert ist, zur Messung benutzt. Das Gleichgewichtpotential kann hier bei — 0,66 Volt liegen. Diese Erscheinung hat zur Folge, daß auch der umgekehrte Vorgang, die kathodische Eisenabscheidung, ein verzögerter ist. Das Abscheidungspotential liegt bei Zimmertemperatur für Chlorid- und Sulfatlösungen bei $\varepsilon_h = -0{,}6$ bis 0,7 Volt, also weit über dem Gleichgewichtpotential.

Das Potential für die Ionenumladung $Fe^{\cdot\cdot} \rightarrow Fe^{\cdot\cdot\cdot}$ berechnet sich aus der Kette Pt (platiniert) | $FeCl_3, FeCl_2, HCl$ | gegen die Normalkalomelelektrode zu + 0,75 Volt.

Ueber komplexe Ionen siehe die analytische und die spezielle Chemie.

7. Analytische Chemie. 7a) Qualitative Analyse. α) Vorproben auf trockenem Wege. Auf Kohle vor dem Lötrohr bei Gegenwart von Soda erhitzt, werden alle Eisenverbindungen zu Metall reduziert. Man erhält kein Metallkorn, sondern Metallflitterchen.

Die Phosphorsalzperle gibt je nach der Konzentration des aufgelösten Eisens und der Temperatur verschiedene Färbungen, die in der Oxydations- und Reduktionsflamme ziemlich gleichartig sind. Die Farbänderung verläuft bei größerer Konzentration von rot zu gelbgrün, bei geringer von gelb zu farblos in der Kälte. Die Boraxperle durchläuft in der Oxydationsflamme die Farben rot bis gelb, in der Reduktionsflamme die Farben braun bis schmutziggrün mit abnehmender Temperatur.

β) Nachweis auf nassem Wege.

I. Reaktionen auf $Fe^{\cdot\cdot}$-Ionen.

Schwefelwasserstoff fällt aus sauren Lösungen kein Sulfid. Mit Schwefelammon fällt quantitativ FeS, das sich in Säuren löst.

$$FeSO_4 + (NH_4)_2S = FeS + (NH_4)_2SO_4.$$

Natronlauge erzeugt bei Luftabschluß eine vollständige Fällung von weißem Ferrohydroxyd, welches durch Luftsauerstoff rasch grünschwarz (Ferriferrohydroxyd) und schließlich rotbraun (Ferrihydroxyd) wird.

$$FeSO_4 + 2NaOH = 2Fe(OH)_2 + Na_2SO_4.$$

Ammoniak gibt bei Gegenwart von Ammoniumsalzen bei Luftabschluß keine Fällung (Zurückdrängung der OH'-Ionen-Konzentration durch die Gegenwart des gleichartigen NH_4-Ions aus dem Ammonsalze. Bei Abwesenheit von Ammonsalzen tritt Fällung ein wie bei Natronlauge.

Natriumcarbonat gibt einen weißen, in Säuren leicht löslichen Niederschlag, der durch Luftsauerstoff unter Kohlensäureabspaltung allmählich in braunes Ferrihydroxyd übergeht.

$$FeSO_4 + Na_2CO_3 = FeCO_3 + Na_2SO_4$$
$$2FeCO_3 + 3H_2O + O = 2CO_2 + 2Fe(OH)_3.$$

Kaliumcyanid erzeugt zunächst einen rotbraunen Niederschlag von Ferrocyanid, der sich im Ueberschuß des Fällungsmittels unter Bildung des Kaliumsalzes der komplexen Ferrocyanwasserstoffsäure löst. Die Ferroionen verschwinden dabei und die vorher beschriebenen Reaktionen bleiben nunmehr aus:

$$FeSO_4 + 2KCN = K_2SO_4 + Fe(CN)_2$$
$$Fe(CN)_2 + 4KCN = K_4[Fe(CN)_6].$$

Kaliumeisen(III)cyanid gibt einen blauen, in Säuren unlöslichen Niederschlag von Turnbulls Blau (a), der in alkalischer Lösung grünschwarz wird (b), charakteristische Reaktion auf Ferrosalze.

$$\text{a) } 3FeSO_4 + 2K_3[Fe(CN)_6] = Fe_3[Fe(CN)_6]_2 + 3K_2SO_4.$$
$$\text{b) } Fe_3[Fe(CN)_6]_2 + 8KOH = \underbrace{2K_4[Fe(CN)_6] + 2Fe(OH)_2}_{\text{Grünschwarz.}} + Fe(OH)_2.$$

Führt man die Reaktion a mit weniger als einem Molekül Ferrosulfat aus, so erhält man lösliches Turnbullsches Blau, das durch K-Ionen aussalzbar ist.

$$K_3[Fe(CN)_6] + FeSO_4 = K\,Fe[Fe(CN)_6] + K_2SO_4.$$

Kaliumeisen(II)cyanid fällt bei Luftabschluß aus 1 Mol. Ferrosulfat weißes Eisen(II)kaliumeisen(II)cyanid (a), bezw. aus 2 Mol. Ferrosulfat Eisen(II)eisen(II)cyanid(b).

$$\text{a) } K_4[Fe(CN)_6] + FeSO_4 = K_2SO_4 + K_2Fe[Fe(CN)_6].$$
$$\text{b) } K_4[Fe(CN)_6] + 2FeSO_4 = 2K_2SO_4 + Fe_2[Fe(CN)_6].$$

Beide Niederschläge oxydieren sich rasch an der Luft, wobei aus a lösliches Berliner

Digitized by Google

Blau, aus b unlösliches Berliner Blau gebildet wird. Das lösliche Berliner Blau scheint identisch mit dem löslichen Turnbullschen Blau zu sein.

Rhodankalium gibt zum Unterschied von Ferrisalzen keine Reaktion.

II. Reaktionen auf $Fe^{\cdots}$-Ion.

Schwefelwasserstoff reduziert in schwach salzsaurer Lösung zu Ferrosalz unter Schwefelabscheidung. Ausfällung von FeS findet nicht statt.

Schwefelammon reduziert in gleicher Weise, und fällt, im Ueberschuß angewandt, sofort FeS.

Natronlauge, Ammoniak, Natriumcarbonat, Baryumcarbonat erzeugen eine vollständige Fällung von rotbraunem $Fe(OH)_3$.

$$FeCl_3 + 3NaOH = Fe(OH)_3 + 3NaCl.$$

Natriumacetat gibt in der Kälte eine Rotfärbung, in der Hitze durch zunehmende Hydrolyse einen rotbraunen, in Säuren löslichen Niederschlag, der sich beim Erkalten wieder löst.

$$FeCl_3 + 3NaC_2H_3O_2 = Fe(C_2H_3O_2)_3 + 3NaCl \text{ (kalt)}.$$

$$Fe(C_2H_3O_2)_3 + 2H_2O \rightleftarrows Fe(OH)_2C_2H_3O_2 + 2H.C_2H_3O_2 \text{ (heiß)}.$$

Natriumphosphat fällt gelblichweißes Ferriphosphat, das in Essigsäure unlöslich, leicht löslich dagegen in Mineralsäuren ist. Um die Fällung quantitativ zu machen, führt man sie deshalb bei Gegenwart von Alkaliacetat aus.

$$FeCl_3 + Na_2HPO_4 + Na.C_2H_3O_2 = 3NaCl + H.C_2H_3O_2 + FePO_4.$$

Rhodankalium oder Rhodanammonium erzeugen eine blutrote, mit Aether oder Amylalkohol ausschüttelbare Färbung von Ferrirhodanid, und zwar tritt, da die Reaktion umkehrbar, bei einem Ueberschuß von Ferrisalz oder Rhodankalium die Rotfärbung am intensivsten auf.

$$FeCl_3 + 3KCNS \rightleftarrows 3KCl + Fe(CNS)_3.$$

Diese sehr empfindliche Reaktion versagt bei Anwesenheit von viel Alkaliacetat, ferner bei Gegenwart von weinsauren Salzen in neutraler Lösung, von Mercurichlorid und von salpetriger Säure. Andererseits erzeugt konzentrierte HNO_3 ohne Gegenwart von Ferrisalz mit $NH_4.SCN$ eine ausschüttelbare, nach einiger Zeit verschwindende, Rotfärbung, herrührend von Zersetzungsprodukten der Rhodanwasserstoffsäure.

Kaliumeisen(II)cyanid gibt in neutraler oder saurer Lösung eine Fällung von Berliner Blau, das in Oxalsäure und konzentrierter Salzsäure löslich ist, und mit Alkalien, wie alle Ferrisalze, unter Bildung von Ferrihydroxyd zersetzt wird.

$$4FeCl_3 + 3K_4[Fe(CN)_6] = Fe_4[Fe(CN)_6]_3 + 12KCl.$$

Versetzt man Kaliumeisen(II)cyanid mit weniger als einem Molekül Ferrisalz, so erhält man lösliches Berliner Blau, das mit K-Ionen aussalzbar ist.

$$FeCl_3 + K_4[Fe(CN)_6] = KFe[Fe(CN)_6] + 3KCl.$$

Kaliumeisen(III)cyanid erzeugt in Ferrisalzlösungen nur eine braune Färbung.

Allgemein ist zu den Reaktionen auf $Fe^{\cdots}$-Ionen zu bemerken: Anwesenheit von organischen Oxysäuren z. B. Weinsäure, ferner von Glycerin, Zucker und anderen Hydroxylverbindungen, hindert die Fällung des Eisens durch Ammoniak, Natronlauge, Natriumcarbonat, Alkaliacetat und -Phosphat. Schwefelammon fällt dagegen FeS aus.

7b) Quantitative Analyse. α) Bestimmung als Fe_2O_3. Wesentlich für diese Art der Bestimmung ist das Vorhandensein dreiwertigen Eisens. Zu diesem Zweck behandelt man die wässerige Lösung, z. B. eine solche von Ferrosulfat in der Hitze mit einigen ccm konzentrierter Salpetersäure und versetzt nach der Oxydation ebenfalls in der Hitze mit einem geringen Ueberschuß von Ammoniak. Auf diese Weise fällt das Eisen in dunkelrotbraunen Flocken aus, die man filtriert, mit heißem Wasser auswäscht, trocknet und in einem Porzellantiegel verbrennt. Zum Schluß erhitzt man noch eine Zeitlang im halbbedeckten Tiegel über der Bunsenflamme, nicht jedoch auf dem Gebläse, da hierdurch leicht Fe_3O_4 gebildet wird, was zu niedrige Resultate geben würde. Man wägt als Fe_2O_3. Organische Substanzen dürfen bei der Fällung nicht zugegen sein (vgl. oben bei der qualitativen Analyse).

β) Bestimmung als metallisches Eisen. Liegen Eisenoxyde vor, so führt die Reduktion im Wasserstoffstrom zu metallischem Eisen rasch und bequem zum Ziel. Man bringt zu diesem Zweck die zu analysierende Substanz in einem Porzellanschiffchen in ein Rohr von schwer schmelzbarem Glas und leitet bei heller Rotglut einen getrockneten Wasserstoffstrom darüber, bis sich an den kalten Teilen des Rohres keine Wassertröpfchen mehr bilden. Man läßt darauf im Wasserstoffstrom erkalten, verdrängt den Wasserstoff durch Kohlensäure und wägt das entstandene graue Eisen.

γ) Maßanalytische Bestimmung. Von den maßanalytischen Methoden ist die Permanganatbestimmung die einfachste und genaueste. Die Bestimmung verlangt zweiwertiges Eisen und beruht auf der Oxydation von $Fe^{\cdot\cdot}$ zu $Fe^{\cdots}$-Ion in saurer Lösung entsprechend der Gleichung:

$$2KMnO_4 + 10FeSO_4 + 8H_2SO_4 = K_2SO_4 + 2MnSO_4 + 5Fe_2(SO_4)_3 + 8H_2O.$$

Digitized by Google

Liegt das Eisensalz in dreiwertiger Form vor, so muß es vorher durch Zink und Schwefelsäure zu Ferrosalz reduziert werden.

Ohne jede Schwierigkeit kann diese Bestimmung bei Abwesenheit von Salzsäure ausgeführt werden. Man säuert die zu titrierende Ferrosalzlösung mit Schwefelsäure stark an und verdünnt mit Wasser auf ca. 400 ccm. Hierauf läßt man aus einer Bürette bis zur bleibenden Rotfärbung $^1/_{10}$ n-Kaliumpermanganatlösung zufließen und berechnet aus der verbrauchten Menge $KMnO_4$ das vorhandene Eisen (1 Gewichtsteil $KMnO_4$ entspricht 5 Teilen Eisen). Muß die Titration in salzsaurer Lösung vorgenommen werden, so titriert man, da Salzsäure durch Permanganat bei Gegenwart von Ferrochlorid zu Chlor oxydiert wird, bei Gegenwart von Mangansulfat und Phosphorsäure, da unter diesen Umständen keine Chlorbildung eintritt, ferner die Schärfe des Umschlags infolge Bildung farbloser komplexer Phosphatverbindungen nicht beeinträchtigt wird. Man setzt also zur Ausführung der Bestimmung ca. 5 g Mangansulfat und 3 ccm syrupöse Phosphorsäure hinzu und führt im übrigen die Bestimmung wie oben angegeben aus.

7c) Elektroanalyse: Für die quantitative elektroanalytische Bestimmung kommt praktisch einzig die von Classen ausgearbeitete Methode in Ammonoxalatlösung in Betracht. Man kann sowohl von Ferro- wie Ferrisalzlösung ausgehen, kann ferner kalt und heiß elektrolysieren, nur muß man Sorge tragen, daß nicht Nitrate oder freie Salzsäure anwesend sind. Das abgeschiedene Eisen ist kohlenstofffrei, sobald man den Strom nach der Abscheidung der letzten Spuren Eisen unterbricht; setzt man die Elektrolyse unnütz lange fort, so erfolgt durch Reduktion der aus der Oxalsäure entstammenden CO_3-Anionen Abscheidung von Kohlenstoff. Man verwendet auf 0,2 g Metall ca. 7 g Ammonoxalat, verdünnt das ganze auf ca. 150 ccm und elektrolysiert in einer matten oder polierten Platinschale mit einer Badspannung von 2 bis 4 Volt und einer Stromdichte $ND_{100} = 1$ bis 1,5 Amp. bei gewöhnlicher Temperatur, 0,5 bis 1 Amp. in der Wärme. Nach Entfärbung der Lösung prüft man mittels überschüssigem Rhodankalium und Salzsäure eine Probe der zuvor mit HNO_3 oxydierten Lösung, hebert ab, falls keine Rotfärbung mehr auftritt, und reinigt die Schale mit Wasser. Nach dem Waschen mit Alkohol und Aether trocknet man im Luftbade bei 70 bis 80°.

Auch die Schnellfällung des Eisens mittels mechanischer oder nach Frary mittels magnetischer Rührung liefert gute Resultate. Man elektrolysiert mit einer Badspannung von 6 bis 7 Volt und einer Stromstärke von 7 Ampere. Die Dauer einer derartigen Elektroanalyse beträgt 25 bis 30 Minuten. Außer dem Zusatz von Ammonoxalat tut man in diesem Falle gut, noch 1 ccm gesättigte Oxalsäurelösung hinzuzusetzen.

8. Spezielle Chemie. 8a) Allgemeines Verhalten des Metalls. Eisen ist unedler als Wasserstoff, infolgedessen löst es sich leicht in verdünnten Säuren unter Wasserstoffentwickelung zu den entsprechenden Salzen auf. Gegen konzentrierte Schwefelsäure und sogenannte Mischsäure (Salpetersäure und Schwefelsäure) ist es dagegen sehr beständig. Technische Prozesse, wie Sulfurierungen und Nitrierungen können daher in eisernen Gefäßen ausgeführt werden. Auch von Alkalien wird Eisen kaum angegriffen. Ein merkwürdiges Verhalten zeigt es konzentrierter Salpetersäure gegenüber. Es geht ebenso wie Chrom, Nickel und Kobalt in den passiven Zustand über, d. h. es wird edler und verdrängt nicht mehr den Wasserstoff in den Säuren, auch vermag es edleren Elementen wie z. B. dem Kupfer nicht mehr seine Ladungen zu entziehen. Die Erklärung für diese Erscheinung ist vielleicht in einer oberflächlichen Oxydation des Metalls zu suchen, die es vor äußeren Angriffen schützt, oder aber kann man die Tatsache auch derart begründen, daß die Passivität auf einer sehr kleinen Geschwindigkeit des Vorgangs $Fe \rightarrow Fe^{\cdot\cdot} + 2\ominus$ beruht, die in einer festen Lösung von Sauerstoff, der z. B. aus der Salpetersäure stammen kann, ihre Ursache hat. Umgekehrt kann man auch annehmen und damit kommt man vielleicht den Tatsachen am nächsten, daß im aktiven Zustand der Vorgang $Fe \rightarrow Fe^{\cdot\cdot} + 2\ominus$ durch einen positiven Katalysator, nämlich durch mit Eisen legierten Wasserstoff, beschleunigt wird. Der passive Zustand kann auch durch anodische Polarisation hervorgerufen werden. An trockener Luft ist das Eisen beständig, an feuchter Luft überzieht es sich mit einer Oxydschicht, es rostet. Zur Rostbildung ist nicht, wie man früher annahm, Kohlensäure notwendig, indem sich durch hydrolytische Spaltung des gebildeten Carbonats Eisenhydrate bilden. Eisen rostet auch unter vollständigem Kohlensäureabschluß. Wahrscheinlich tritt Rostbildung dadurch ein, daß in Wasser gelöster Sauerstoff OH'-Ionen bildet, deren negative Ladung durch die positive Ladung von in Lösung befindlichen Eisen-Ionen kompensiert wird. Da das Löslichkeitsprodukt von Eisenhydroxyd sehr klein ist, tritt Ausscheidung ein und der Vorgang, die Rostbildung, schreitet weiter. Um Eisen vor äußeren Angriffen zu schützen, verzinkt man es. Hierdurch erhält man ein kurz geschlossenes galvanisches Element, in der Zink als unedleres Metall die Lösungselektrode bildet, während

Digitized by Google

das Eisen unangegriffen bleibt. Mit Sauerstoff reagiert Eisen, namentlich, wenn es bei schwacher Rotglut durch Reduktion im Wasserstoffstrom erhalten wurde, bereits bei gewöhnlicher Temperatur, es besitzt pyrophorische Eigenschaften. Wasserdampf zersetzt das Metall je nach der Temperatur unter Bildung verschiedenartiger Oxyde. In der Gegend von 350° entsteht, da hier der Dissoziationsdruck des Sauerstoffs aus dem Wasserdampf nur wenig größer als der des FeO ist, hauptsächlich dieses Oxyd. Erst von 820° an wird der Sauerstoffdruck des Fe_3O_4 und damit dessen Bildung erreicht. Wasserstoff wird von Eisen absorbiert und zwar wächst die Löslichkeit, die bei 800° ca. 0,2 mg pro 100 g Metall beträgt, mit der Temperatur. Charakteristische Sprünge treten in der Löslichkeitskurve beim Uebergang von β- in γ-Eisen und besonders, wie auch beim Nickel und Kobalt, beim Schmelzpunkt auf. Der Uebergang von α- in β-Eisen ist dagegen in der Kurve nicht erkennbar. Wie beim Platin, Nickel und Kobalt und anderen Metallen ist auch hier die Löslichkeit bei konstanten Temperaturen, bis herab zu Drucken von ungefähr 100 mm, der Quadratwurzel aus dem Wasserstoffdruck proportional, also offenbar auch hier atomistisch gelöster Wasserstoff anzunehmen. Eine besondere Rolle spielt die Wasserstoffabsorption bei der elektrolytischen Abscheidung des Eisens. Elektrolyteisen ist stets wasserstoffhaltig und zwar um so stärker, je höher die Stromdichte und je niedriger die Elektrolyttemperatur liegt. Technisch ist nun der Wasserstoffgehalt eines Eisens von großer Bedeutung, da derartiges Metall, obgleich es sehr rein ist, zur Herstellung von Elektromagneten wegen der stark auftretenden Hysteresiserscheinung (magnetische Nachwirkung) nicht brauchbar ist. Es bedeutete daher einen großen Fortschritt, daß es kürzlich gelungen ist, reines wasserstofffreies Elektrolyteisen herzustellen, welches, zum Bau von Motoren verwandt, einen Nutzeffekt ergab, der bisher nicht erreicht werden konnte. — Zur Stickstoffabsorption scheint das Eisen, ebenso wie das Nickel und Kobalt, nur wenig Neigung zu haben. Erst bei 1200° findet langsame Absorption statt, die beim Schmelzpunkte unter gleichzeitiger Nitridbildung lebhafter wird. — Feinverteiltes Eisen, wie man es aus Eisenoxalat durch Reduktion im Wasserstoffstrom erhält, verbindet sich bei 80° unter starkem Druck mit Kohlenoxyd zu Eisentetracarbonyl $Fe(CO)_4$. Unter bestimmten Bedingungen kann man auch ein Eisenpentacarbonyl gewinnen, das wiederum im Licht in Heptacarbonyl zerfällt. Bei hohen Temperaturen wird Kohlenoxyd durch feinverteiltes Eisen katalytisch in Kohle und Kohlensäure gespalten.

8b) Verbindungen des zweiwertigen Eisens, Ferroverbindungen.

Ferrooxyd, Eisen(II)oxyd, Eisenoxydul, FeO entsteht durch Erhitzen von Eisen(II)oxalat bei Luftabschluß oder auch durch Reduktion von Eisen(III)oxyd mit Kohlenoxyd bei 500° als samtschwarzes Pulver von pyrophorischen Eigenschaften. Auf 1000° erhitzt bildet es eine stabilere Modifikation, die an trockener Luft haltbar ist. In Mineralsäuren ist es leicht löslich.

Ferrohydroxyd, Eisen(II)hydroxyd, Eisenhydroxydul, $Fe(OH)_2$, bildet sich bei Sauerstoffabschluß als weißer Niederschlag beim Versetzen einer Eisen(II)salzlösung mit Kaliumhydroxyd (vgl. 7, qualitative Analyse).

Ferrosulfid, Eisen(II)sulfid, Eisensulfür, FeS, in der Natur als Troilit vorkommend, bildet sich durch direktes Zusammenschmelzen aus den Komponenten. Es stellt eine metallglänzende Masse von dunkelgrauer bis grauschwarzer Farbe vor und schmilzt bei 950°. Es dient zur Herstellung von Schwefelwasserstoff.

Ferrochlorid, Eisen(II)chlorid, Eisenchlorür, $FeCl_2$, bildet sich wasserfrei durch Glühen von Eisenpulver in einem Strom von trockenem Chlorwasserstoffgas in Form weißer Schuppen, die bei Rotglut schmelzen und schließlich in glänzenden Blättchen sublimieren. Der Siedepunkt liegt bei 1400°. 100 g Wasser lösen bei 20° 68,5 g anhydrisches Salz. Aus der wässerigen konzentrierten Lösung scheidet sich in der Kälte das Hydrat $FeCl_2 + 4\,H_2O$ in grünen Kristallen ab, die an der Luft durch Oxydation leicht gelbbraune Farbe annehmen. Ein zweites Hydrat $FeCl_2 + 2\,H_2O$ mit dem Uebergangspunkt bei 80° erhält man durch Kristallisation aus heißen Lösungen, oberhalb der Uebergangstemperatur. Am bequemsten erhält man Lösungen von Eisen(II)chlorid durch Auflösen von Eisen in Salzsäure.

Ferrobromid, Eisen(II)bromid, Eisenbromür, $FeBr_2$, entsteht unter heftiger Reaktion direkt aus den Elementen. Da bei höherer Temperatur Eisen(III)bromid stets in Eisen(II)bromid und Brom dissoziiert, erhält man unter diesen Bedingungen notwendigerweise stets das II-Bromid. Technisch wichtig ist ein Gemisch von II-Bromid und III-Bromid für die Darstellung von Bromkalium und Bromnatrium, da beim Umsatz dieses Sesquibromides mit den entsprechenden Alkalicarbonaten unter Kohlensäureabspaltung neben Bromalkali ein gut filtrierbares, körniges Eisen(II)Eisen(III)hydroxyd entsteht. Konzentrierte Lösungen von Eisen(II)bromid scheiden in der Kälte blaugrüne Kristalle der Zusammensetzung $FeBr_2 + 4\,H_2O$ ab.

Ferrojodid, Eisen(II)jodid, Eisenjodür, FeJ_2, entsteht ebenfalls direkt aus

Digitized by Google

den Elementen und kristallisiert aus kaltem Wasser mit 4 Molekülen H_2O.

Ferrosulfat, Eisen(II)sulfat, Eisenoxydulsulfat, Eisenvitriol, $FeSO_4+7H_2O$, findet sich, wahrscheinlich durch Oxydation von Pyriten entstanden, in der Natur. Durch Lösen von Eisen oder Eisen(II)sulfid in verdünnter Schwefelsäure ist es leicht herzustellen. Es kristallisiert monoklin, mitunter jedoch auch rhombisch, in blaßgrünen Kristallen mit 7 Molekülen H_2O, oxydiert sich jedoch leicht zu basischem gelbbraunem Sulfat. 100 g Wasser lösen bei 20° 26,42 g anhydrisches Salz. Andere Hydrate sind das 4-Hydrat mit einem Uebergangspunkt bei 56,6° und das 1-Hydrat mit einem solchen bei 75,8°. Bei 100° getrocknet verliert das 7-Hydrat 6 Moleküle Kristallwasser, das 7. Molekül geht erst bei 300° fort. Das wasserfreie Salz besitzt weiße Farbe. Beim starken Glühen wird SO_2 und SO_3 abgespalten und es hinterbleibt Eisenoxyd.

Von seinen Doppelsalzen ist das wichtigste das Ammoniumeisen(II)sulfat, $(NH_4)_2Fe(SO_4)_2+6H_2O$, das sogenannte Mohrsche Salz, welches äußerst luftbeständig ist und daher in der Maßanalyse Verwendung findet. Die reduzierende Wirkung des Eisen(II)-sulfats kommt namentlich in seinem Verhalten zu Goldlösungen zum Ausdruck, aus denen Metall ausgefällt wird. In alkalischer Lösung reduziert es organische Farbstoffe wie Indigo zur Leukobase, ferner Nitroverbindungen zu den entsprechenden Amidokörpern. Ein eigentümliches Verhalten zeigt es, wie auch andere Eisen(II)salze, Stickoxyd gegenüber. Dieses Gas wird mit tiefbrauner Farbe gelöst und bildet je nach der Temperatur unbeständige Molekularverbindungen wechselnder Zusammensetzung. Beim Erhitzen zerfallen sie leicht wieder in ihre Komponenten. Vielleicht hat man es mit dem labilen Ionenkomplex $FeNO^{\cdot\cdot}$ zu tun. Eisenvitriol wird als schwaches Desinfektionsmittel, ferner in der Färberei als Beizmittel und zur Darstellung von Tinten verwendet. Der tanninhaltige Galläpfelauszug bildet mit ihm Ferrotannat, welches durch Oxydation an der Luft in beständiges schwarzes Ferritannat übergeht.

Ferronitrat, Eisen(II)nitrat entsteht durch Umsetzung von Eisen(II)sulfat mit Baryumnitrat und bildet ein äußerst zerfließliches Salz. Es kristallisiert mit 6 Mol H_2O bei gewöhnlicher Temperatur aus, doch existiert noch ein 9-Hydrat mit dem Uebergangspunkt bei — 12°. 100 g Wasser lösen bei 20° 83,5 g anhydrisches Salz auf.

Ferrophosphat, Eisen(II)phosphat, $Fe_3(PO_4)_2+8H_2O$, in der Natur den Vivianit bildend, entsteht auf nassem Wege durch Fällen von Eisensulfat mit phosphorsaurem Natrium als gelblich weißer Niederschlag.

Einen Uebergang zwischen zwei- und dreiwertigem Eisen bildet der Magneteisenstein, Fe_3O_4, ein Eisenoxyduloxyd, welches in der Natur häufig in undurchsichtigen schwarzen Oktaedern vorkommt. Fe_3O_4 ist auch der sogenannte Hammerschlag. Synthetisch kann man es durch Verbrennen von Eisen in Sauerstoffgas darstellen. Es bildet das beständigste Oxyd des Eisens, oxydiert sich in der Glühhitze nicht weiter und besitzt stark magnetische Eigenschaften. In Säuren, selbst in konzentrierter Salpetersäure ist seine Löslichkeit sehr gering.

8c) Verbindungen des dreiwertigen Eisens, Ferriverbindungen. Ferrioxyd, Eisen(III)oxyd, Fe_2O_3, kommt in der Natur als Eisenglanz oder Roteisenstein vor. Es bildet sich leicht beim Glühen von Eisennitrat oder Eisensulfat, und entsteht ferner beim Rösten der Pyrite als Nebenprodukt der Schwefelsäurefabrikation (caput mortuum). In stark geglühtem Zustande ist Fe_2O_3 nur sehr langsam in Säuren löslich. Von Wichtigkeit sind seine katalytischen sauerstoffübertragenden Wirkungen, z. B. die Beschleunigung des Vorgangs $SO_2+O \rightleftarrows SO_3$, demgemäß kann Fe_2O_3 den Platinasbest im Kontaktprozeß ersetzen. Es findet praktische Verwendung als Poliermittel, als Farbe (Pariser Rot), ferner in der hüttentechnischen Fabrikation des Eisens. Hydrate des Eisen(III)oxyds wechselnder Zusammensetzung finden sich in der Natur als Brauneisenstein oder brauner Glaskopf, als Brauneisenocker und Nadeleisenerz. $Fe(OH)_3$ Eisen(III)hydroxyd entsteht durch einfache Umsetzung von Eisen(III)-salzen mit Kalilauge. Im Gegensatz zu den Hydraten des Chroms und Aluminiums ist seine Löslichkeit in Alkali nur ganz gering. Es dissoziiert also nur ganz schwach nach dem Säuretypus. Ueber seine Neigung, kolloidale Lösungen zu bilden, siehe 11 Kolloidchemie des Eisens.

Ferrifluorid, Eisen(III)fluorid, FeF_3, direkt synthetisch aus den Elementen darstellbar, ist dadurch interessant, daß es mit Alkalifluoriden komplexe Verbindungen z. B. $Na_3[FeF_6]$ analog dem $Na_3[Fe(CN)_6]$ zu bilden vermag.

Ferrichlorid, Eisen(III)chlorid, $FeCl_3$, sublimiert beim Erhitzen von Eisen im Chlorstrom in Form metallisch glänzender, grünlichschimmernder Blättchen. Es ist enorm hygroskopisch und zerfließt anfeuchter Luft zu einer braunen Flüssigkeit. 100 g Wasser lösen bei 20° 91,8 g anhydrisches Salz. Außer in Wasser löst es sich in vielen organischen Flüssigkeiten, wie Alkohol, Aether, Benzol, Toluol. Aus konzentrierten, wässerigen Lösungen kristallisiert bei Zimmertemperatur ein gelbes Hydrat der Zusammensetzung $FeCl_3+12\,H_2O$. Außer diesem

Digitized by Google

Hydrat kennt man noch das 7-Hydrat, mit einem Umwandlungspunkt bei 27°, das 5-Hydrat mit einem solchen bei 30° und das 4-Hydrat, welches sich zwischen 55° und 66° im Gleichgewicht mit einer Lösung von Eisen(III)chlorid befindet. Das Studium dieser Hydrate ist für die Geschichte der Phasenlehre von großer Bedeutung gewesen, da Bakhuis-Roozeboom an diesem Beispiel die Bedeutung der heterogenen Gleichgewichtslehre in ihren umfassenden Anwendungsmöglichkeiten erkannt hat. Wie bei allen Eisen(III)salzen macht sich in verdünnten Lösungen von Eisenchlorid die Hydrolyse stark bemerkbar, was durch Abscheidung basischer Salze zum Ausdruck kommt.

Während das Eisen(III)bromid $FeBr_3$ bei gewöhnlicher Temperatur beständig ist (man erhält es einfach durch Zusatz entsprechender Mengen Brom zu Eisen(II)-bromid), ist das nur in Lösung bekannte Eisen(III)jodid bereits bei Zimmertemperatur stark in Eisen(II)jodid und Jod dissoziiert.

Ferrisulfat, Eisen(III)sulfat bildet sich in mit Salpetersäure oxydierten Lösungen von Eisen in Schwefelsäure, ist jedoch wegen seiner Zerfließlichkeit schwer isolierbar. In prachtvollen Oktaedern kristallisiert es in Alaunform z. B. als schön amethystfarbener Ammoniumeisenalaun von der Zusammensetzung $(NH_4).Fe(SO_4)_2 + 12\ H_2O$. Bedeutung besitzt ferner der Rubidiumeisenalaun, weil er im Gegensatz zum Kalialaun ohne Zersetzung aus heißen Lösungen umkristallisiert werden kann und hierin eine Methode liegt, Rubidium vom Kalium zu trennen.

8d) Verbindungen, in denen das Eisen höherwertig auftritt. Im Eisendisulfid, FeS_2, dem luftbeständigsten Eisensulfid, das in der Natur dimorph als Pyrit in glänzenden, goldgelben Würfeln, Pentagondodekaedern und anderen Formen des regulären Systems oder aber als Markasit in Form von rhombischen Kristallen auftritt, ist das Eisen wahrscheinlich vierwertig anzunehmen. Bei Luftabschluß erhitzt, verliert der Pyrit Schwefel und verwandelt sich zum Teil in Fe_3S_4 oder FeS. An der Luft geröstet, wird der größte Teil des Schwefels zu SO_2 oxydiert und es hinterbleibt F_2O_3. In Säuren ist FeS_2 kaum löslich.

Sechswertig tritt das Eisen wahrscheinlich in der Eisensäure H_2FeO_4 auf, in der es sich wie Schwefel verhält. Die freie Säure ist unbekannt, dagegen erhält man leicht ihre Salze, wenn man entweder Chlor in eine wässerige Suspension von Eisenhydroxyd in Kalilauge bei 70° leitet oder konzentrierte Kalilauge unter Verwendung einer guß eisernen Anode elektrolysiert. Die Lösung färbt sich purpurrot und das Salz kann in schwarzroten rhombischen Prismen, die mit Kaliumsulfat und Kaliumchromat isomorph sind, kristallisiert erhalten werden. Infolge leichter Hydrolysierbarkeit zerfallen Lösungen dieses Salzes allmählich in Kalilauge Eisenhydroxyd und Sauerstoff. Mitunter scheidet sich hierbei farbloses Natriumferrit, $Na_2Fe_2O_4$, aus. Das der Eisensäure zugrunde liegende Oxyd ist unbekannt.

8e. Komplexe Verbindungen. Die wichtigsten Verbindungen dieser Gruppe sind bereits in dem analytischen Abschnitt erwähnt worden.

Das Ferrocyankalium, Kaliumferrocyanid, Kaliumeisen(II)cyanid, gelbes Blutlaugensalz, $K_4[FeCy_6]$, welches durch Einwirkung von Cyankalium auf Eisensalze nach der Gleichung: $6\ KCN + FeSO_4 = K_4Fe(CN)_6 + K_2SO_4$ entsteht, wurde im großen früher durch Schmelzen von trockenen stickstoffhaltigen tierischen Abfällen (z. B. Blut, daher der Name) und Eisenfeilspänen mit Pottasche bei heller Rotglut hergestellt. Das gebildete Cyankalium und Kaliumeisensulfid $KFeS_2$ setzen sich bei der Extraktion mit Wasser zu gelbem Blutlaugensalz um. Heutzutage verwendet man als Ausgangsmaterial die trockene Gasreinigungsmasse, d. h. Eisenhydroxyd, welches das im Steinkohlenteergas enthaltene Cyan neben Schwefel gebunden enthält.

Gelbes Blutlaugensalz stellt ein zitronengelbes Salz vor, das in großen monoklinen Prismen kristallisiert. 100 g Wasser lösen bei 20° 25,1 g anhydrisches Salz. Zum Schmelzen erhitzt, zerfällt es in Stickstoff, Cyankalium und Eisenkarbid. Konzentrierte Schwefelsäure zersetzt das Salz unter Bildung von Kohlenoxyd, verdünnte Säure unter Entwickelung von Blausäure.

Die freie Ferrocyanwasserstoffsäure erhält man aus konzentrierten Lösungen des Kaliumsalzes mit Salzsäure in Form von unbeständigen weißen Kristallen.

Durch Oxydation der wässerigen Lösung mit Chlor oder durch anodische Oxydation erhält man das rote Blutlaugensalz, Ferricyankalium, Kaliumferricyanid, Kaliumeisen(III)cyanid, $K_3[FeCy_6]$, welches wasserfrei in dunkelroten monoklinen Prismen kristallisiert. 100 g Wasser lösen bei 20° 30,3 g anhydrisches Salz auf. Durch Zugabe von konzentrierter Salzsäure fällt neben Kaliumchlorid die freie Ferricyanwasserstoffsäure aus in Form von weißen Kristallen, die wasser- und alkohollöslich sind.

Die Bildung von löslichem und unlöslichem Berliner und Turnbullschen Blau ist im analytischen Teil ausführlich beschrieben.

9. **Thermochemie.** Bildungswärme der wichtigsten Eisenverbindungen für je 1 g-Molekül in g-Kalorien.

Digitized by Google

	Bildungswärme
$FeCl_2$	82 200 cal
$FeCl_2$, Aqua*)	102 100 „
$FeCl_3$	96 000 „
$FeCl_3$, Aqua	128 600 „
$FeBr_2$, Aqua	78 100 „
FeJ_2, Aqua	47 650 „
FeO	64 600 „
$Fe(OH)_2$	68 300 „
Fe_2O_3	3 × 64 800 „
$Fe(OH)_3$	95 600 „
Fe_3O_4	4 × 67 700 „
$FeSO_4$, Aqua	235 600 „
$FeSO_4$, $7H_2O$	240 100 „
$Fe(NO_3)_2$, Aqua	119 000 „
$FeCO_3$	184 500 „
$Fe_2(SO_4)_3$, Aqua	652 100 „
$Fe(NO_3)_3$, Aqua	314 300 „

*) Aqua bedeutet wässrige Lösung.

10. Spektralchemie. Die Linien des Eisen-Bogenspektrums — nach Exner und Haschek sind es vom Ultraviolett bis tief ins rote Gebiet hinein 2392 — werden ihrer großen Schärfe wegen in der Regel als Standardlinien bei Wellenlängenmessungen benutzt und sind daher von verschiedenen Spektroskopikern sehr genau gemessen worden. Rowland gibt in seiner „Table of Standard wave lengths" die Wellenlängen des Bogen- und Funkenspektrums. Eine vollkommene Zusammenstellung der Eisenlinien im Sonnenspektrum befindet sich in Rowlands „Preliminary table of solar spektrum wave lenghts". — Die Lösungen der einfachen Ferro- und Ferrisalze geben kein sehr charakteristisches Absorptionsspektrum; es zeigen sich nur diffuse einseitige Auslöschungen. Charakteristische Banden treten dagegen in stärker komplexen Eisenverbindungen auf, z. B. in ätherischen oder amylalkoholischen Lösungen des Eisenrhodanids, auch in der alkoholischen Lösung des Ferrichlorids.

11. Kolloidchemie. Die Darstellung von kolloidalem Eisen kann durch kathodische elektrische Zerstäubung von Eisendrähten in ausgekochtem gekühlten Wasser durchgeführt werden. Allerdings besitzen derartige Sole, da das Eisen unedler als Wasserstoff ist, nur eine äußerst geringe Beständigkeit, und bestehen wahrscheinlich zum Teil immer aus kolloidalem Hydroxyd.

Eine kolloidale, in der Kälte unbegrenzt haltbare Lösung von Eisen(III)hydroxyd läßt sich leicht herstellen durch vorsichtige in der Kälte durchgeführte genaue Neutralisation einer 30% filtrierten Lösung von Eisen(III)chlorid mit 25% Ammoniumcarbonatlösung und nachfolgender mehrtägiger Dialyse. Beim Kochen oder Zusatz von Elektrolyten tritt Ausflockung ein.

Literatur. *A.* **Ledebur**, *Handbuch der Eisenhüttenkunde, Leipzig, Felix, 1906 bis 1908, 3 Bde.* — *A.* **von Jüptner**, *Grundzüge der Siderologie, Leipzig, Felix, 1900 bis 1904, 4 Bde.* — *H.* **Wedding**, *Grundriß der Eisenhüttenkunde, Berlin, Springer, 1907.* — *O.* **Dammer**, *Handbuch der anorganischen Chemie, Stuttgart, Encke, III. Bd. 1893 und IV. Bd. 1903 („Fortschritte der anorganischen Chemie in den Jahren 1892 bis 1902").* — **Graham und Otto**, *Lehrbuch der anorganischen Chemie 1889, Braunschweig, Vieweg & Sohn.* — *Der Band Eisen ist ferner in den Handbüchern von* **Gmelin-Kraut** *und von* **Abegg** *im Erscheinen begriffen.*

F. **Sommer.**

b) Kobalt.

Co. Atomgewicht 58,97.

1. Atomgewicht. 2. Vorkommen. 3. Geschichte. 4. Darstellung und Verwendung. 5. Physikalische Eigenschaften und Konstanten. 6. Valenz und Elektrochemie. 7. Analytische Chemie. 8. Spezielle Chemie. 9. Thermochemie. 10. Spektralchemie.

1. Atomgewicht. Das Atomgewicht des Kobalts ist von der internationalen Atomgewichtskommission 1912 zu 58,97 angenommen worden.

2. Vorkommen. Co ist ein ständiger Begleiter der Nickelerze und findet sich in der Natur in ganz ähnlicher Weise wie das Nickel in Verbindungen mit Schwefel und Arsen, in sehr geringen Mengen kommt es auch im Meteoreisen vor. Man kennt den Kobaltkies Co_3S_4, den Speiskobalt $CoAs_2$, den Tesseralkies $CoAs_3$, den Glanzkobalt $CoAs_2+CoS_2$, die Kobaltblüte $Co_3As_2O_8+8H_2O$, den schwarzen Erdkobalt $CoO.2MnO_2+4H_2O$, ferner den Kobaltvitriol von der Zusammensetzung $CoSO_4+7H_2O$.

3. Geschichte. Kobaltverbindungen — das Wort Kobalt ist synonym mit Kobold und ist wie Nickel ein Spottname für das Metall, welches trotz des schönen Aussehens kein Edelmetall (Silber) darstellte — sind seit den ältesten Zeiten bekannt. So benutzten schon die alten Aegypter Kobaltverbindungen zum Blaufärben von Glas. In den sächsischen Blaufarbenwerken wird seit über 400 Jahren die Smaltefabrikation betrieben, indem durch Schmelzen der gerösteten Kobalterze mit Kieselsäure und Pottasche prachtvolles, tief blau gefärbtes Kobaltoxydulkaliglas, Smalte, mit 2 bis 7% CoO hergestellt wird. Das Metall selbst wurde zuerst im Jahre 1733 von Brandt in Stockholm in unreinem Zustande gewonnen, aber erst die moderne Entwickelung der analytischen Chemie, die die völlige Trennung des Nickels vom Kobalt lehrte, gestattete die Herstellung reinen Metalls.

4. Darstellung und Verwendung. Metallisches Kobalt kann wie das Nickel leicht durch Reduktion seiner Oxyde mittels

Digitized by Google

Wasserstoff bei zirka 200° oder Kohle bei Weißglut, ferner durch starkes Glühen des Oxalats gewonnen werden. Technisch wird das Metall kaum hergestellt, da es trotz seiner wertvollen Eigenschaften zu selten ist, um industriell verwertet zu werden. Wie schon erwähnt, wird Kobalt hauptsächlich in Form von Oxyd verwendet, welches durch die Eigenschaft, Glasflüsse blau zu färben, hohen technischen Wert besitzt. Auch als feuerbeständige Glasur- und Emailfarbe hat es Bedeutung, während es als Anstrich- oder Malerfarbe seit dem Jahre 1845 vom Ultramarin verdrängt wurde.

5. Physikalische Eigenschaften und Konstanten. Das Co ist ein silberweißes Metall von starkem Glanz, mit einem Stich ins Bläuliche, etwa wie das Zink. Von allen Metallen besitzt es die größte Zähigkeit, nur einige Stahlsorten übertreffen es in dieser Beziehung. Infolge seiner großen Dehnbarkeit läßt es sich wie das Nickel zu dünnstem Draht ausziehen. Das Metall ist stärker magnetisch als das Nickel, etwas weniger als das Eisen. Bei 1150° verliert es die Eigenschaft der Magnetisierbarkeit plötzlich. Sein Schmelzpunkt liegt bei 1464°, etwa 30° höher als der des Nickels. In der Knallgasflamme oder beim Behandeln mit starken elektrischen Strömen ist das Metall flüchtig, jedoch schwerer als das Nickel.

Physikalische Konstanten.

Das spezifische Gewicht beträgt für geschmolzenes Metall: $d\frac{21}{4} = 8{,}718$, für im Wasserstoffstrom reduziertes im Mittel 8,357. Die Härte ist nach der Mohsschen Skala 5,5. Der Ausdehnungskoeffizient berechnet sich zwischen 0° und 300° zu $\alpha_t = 10^{-8}(1280 + 0{,}75t + 0{,}0035\,t^2)$. Die spezifische Wärme besitzt für das Intervall —182° bis +15° den Wert 0,0822, für das Intervall +15° bis +350° den Wert 0,1087. Die elektrische Leitfähigkeit beträgt für 99,8% Metall bei 20° $10{,}3 \times 10^4$.

6. Valenz und Elektrochemie. Kobalt tritt zwei- und dreiwertig auf, jedoch überwiegt die Zweiwertigkeit. Kobalt(II)-chlorid und Kobalt(II)bromid besitzen demgemäß in Pyridinlösung die monomolekulare Zusammensetzung $CoCl_2$ und $CoBr_2$. Auch das Kobalt(II)acetylacetonat besitzt normale, der Formel $Co(C_5H_7O_2)_2$ entsprechende Dampfdichte. Ferner ist die Isomorphie des Kobalt(II)sulfats $CoSO_4.7H_2O$ mit den Zink- und Magnesiumsulfaten ein weiterer Beweis, wie auch die Mischkristallbildung des $CoCl_2$ mit den gleich zusammengesetzten Manganochloriden vollkommen mit der Zweiwertigkeit im Einklang steht. Die Dreiwertigkeit tritt vornehmlich in den Kobaltialaunen und in der Isomorphie des Kobalticyankaliums mit dem Kaliumeisen(III)cyanid zu Tage. In den Komplexverbindungen mit Ammoniak findet man vornehmlich dreiwertiges Metall. Höhere Wertigkeiten bestehen vielleicht in der kobaltigen Säure und ihren Salzen (Me_2CoO_3), ferner eventuell in der Kobaltsäure H_2CoO_4.

Da das Kobalt zwei Reihen von Salzen bildet, entsprechend zwei- und dreiwertigem Metall, so hat man es in wässeriger Lösung auch mit zwei- und dreiwertigen Kationen zu tun. Die gewöhnlichen Salze leiten sich vom zweiwertigen Metall ab und erteilen beim Lösungsvorgang dem Wasser die rote Farbe des $Co^{\cdot\cdot}$ Ions. In Gegensatz zu diesem ist das $Co^{\cdot\cdot\cdot}$ Ion grün gefärbt und derart zersetzlich, daß es bereits die OH-Ionen des Wassers unter Zerfall in rotes $Co^{\cdot\cdot}$ mit beträchtlicher Geschwindigkeit unter Sauerstoffentwickelung zu zersetzen vermag entsprechend den Gleichungen: $Co^{\cdot\cdot\cdot} + OH' \rightarrow Co^{\cdot\cdot} + OH$; $2OH \rightarrow O + H_2O$. Grüne Kobalt(III)-salzlösungen, z. B. das Sulfat, sind infolgedessen nicht haltbar, da sie nach den Gesetzen der Massenwirkung entsprechend der Konzentration an $Co^{\cdot\cdot\cdot}$- und OH'-Ionen mit bestimmter Geschwindigkeit zerfallen müssen. Die elektrolytisch, durch anodische Oxydation, durchführbare Synthese der grünen Salze geht demgemäß am besten vor sich in saurer Lösung (Verminderung der OH-Ionen) und möglichst niederer Temperatur, da hierdurch Bedingungen gegeben sind, die Zersetzungsgeschwindigkeit gegenüber der Bildungsgeschwindigkeit zu vermindern. Da in stark schwefelsaurer Lösung hierbei das Löslichkeitsprodukt des Kobalt(III)sulfats überschritten wird, kann festes grünes Kobaltsulfat isoliert werden.

Kobaltsalzlösungen sind in geringem Grade hydrolytisch gespalten und zwar etwas schwächer als die entsprechenden Nickelsalzlösungen.

Das dem Vorgang $Co \rightarrow Co^{\cdot\cdot}$ entsprechende Normalpotential (bezogen auf die Einheitskonzentration — 1 g Formelgewicht im Liter — die Normalwasserstoffelektrode als Nullpunkt) beträgt — 0,29 Volt. Das Vorzeichen entspricht der Ladung der Elektrode. Für die Ionenumladung $Co^{\cdot\cdot} \rightarrow Co^{\cdot\cdot\cdot}$ wurde der Wert + 1,8 Volt gefunden.

Entsprechend der geringen Elektroaffinität ist das $Co^{\cdot\cdot\cdot}$Ion in hohem Grade befähigt, Nebenvalenzen zu betätigen. Es existieren daher eine große Reihe von Ionen, in denen das Kobalt, hauptsächlich in dreiwertiger Form, als komplexes Kation bezw. Anion vorkommt. $[Co(CN)_6]'''$, $[Co(NO_2)_6]'''$ und $[Co(NH_3)_6]^{\cdot\cdot\cdot}$ sind die bekanntesten Beispiele.

Auch die eigentümliche Erscheinung, daß Kobalt(II)salze beim Versetzen mit Salzsäure bezw. mit Chloriden wie $CaCl_2$ oder LiCl sich blau färben, ist wahrscheinlich auf Bil-

Digitized by Google

dung komplexer Kobaltionen zurückzuführen. Man hat es in der Lösung hierbei offenbar mit den Anionen $CoCl_3'$ bezw. $CoCl_4''$ zu tun.

7. Analytische Chemie. 7a) Qualitative Analyse: Alle Kobaltverbindungen geben mit Soda und Kohle vor dem Lötrohr erhitzt weiße, glänzende, magnetische Metallflitterchen.

Perlreaktionen: In der Phosphorsalzperle erhält man im Oxydations- sowie im Reduktionsfeuer blauviolette Färbungen. Die Boraxperle erzeugt im Oxydations- wie im Reduktionsfeuer rein blaue Perlen, die beim Erkalten dunkler sind als in der Hitze.

Reaktionen auf Kobalt(II)salze bezw. Co''-Ionen.

Schwefelammon erzeugt einen schwarzen in Essigsäure und 4 prozentiger kalter Salzsäure unlöslichen, in konzentrierter Salpetersäure und Königswasser leicht löslichen Niederschlag von Kobalt(II)sulfid.

$$CoCl_2 + (NH_4)_2S = CoS + 2NH_4Cl.$$

Natronlauge fällt in der Kälte zuerst blaues basisches Salz, das beim Erwärmen und weiterem Zusatz von NaOH in reines rotes Hydroxyd übergeht. Durch Einwirkung von Luftsauerstoff wird der Niederschlag bald mißfarbig und endlich braun unter Bildung von Kobaltoxyduloxydhydrat.

$$CoCl_2 + NaOH = Co\left<{OH \atop Cl}\right. \text{(blau)} + NaCl$$

$$Co\left<{OH \atop Cl}\right. + NaOH = Co\left<{OH \atop OH}\right. \text{(rot)} + NaCl$$

$$3Co(OH)_2 + O = {OH \atop OH}\!\!\left>Co.O.Co.O.Co\right<\!\!{OH \atop OH} \text{(braun)} + H_2O$$

Versetzt man gleichzeitig mit Natronlauge und Bromwasser, so fällt schwarzes Kobaltihydroxyd aus.

Ammoniak verhält sich in geringen Mengen zugesetzt wie NaOH. In überschüssigem Ammoniak löst sich der Niederschlag von Kobalthydroxyd leicht auf unter Uebergang in den wenig beständigen Kobalt(II)amminkomplex, welcher wiederum durch den Sauerstoff der Luft leicht in den beständigeren Kobalt(III)ammoniakkomplex übergeführt wird.

$$2Co\left<{OH \atop Cl}\right. + 14NH_4OH + O = 2[Co(NH_3)_6](OH)_2 + 2NH_4Cl + 11H_2O$$

Natrium- bezw. Kaliumcarbonat fällen rotviolettes basisches Carbonat aus.

Cyankalium erzeugt zunächst einen Niederschlag von schmutzigrosafarbenem Kobaltcyanid, das sich in überschüssigem Cyankali mit grünbrauner Farbe zu dem komplexen Salz $K_2[CoCy_4]$ bezw. $K_4[CoCy_6]$ löst. Beim Kochen unter Sauerstoffzutritt färbt sich die Lösung durch Oxydation unter Bildung des sehr beständigen Kobalt(III)komplexes $K_3[CoCy_6]$ gelb und gibt jetzt mit Natronlauge und Brom keinen Niederschlag mehr (Unterschied vom Nickel).

$$CoCl_2 + 2KCN = Co(CN)_2 + 2KCl$$

$$Co(CN)_2 + 4KCN = K_4[Co(CN)_6]$$

$$2K_4[Co(CN)_6] + O + H_2O = 2K_3[Co(CN)_6] + 2KOH$$

Rhodanammon färbt Kobaltsalzlösungen blau unter Bildung von komplexen $(NH_4)_2[Co(SCN)_4]$. Letzteres geht beim Ausschütteln mit einem Gemisch gleicher Teile Amylalkohol und Aether mit intensiv blauer Farbe in die ätherische Lösung. Eventuell vorhandenes Eisen fällt man vorher durch Zusatz von etwas Soda als Carbonat aus.

Konzentrierte Kaliumnitritlösung erzeugt in essigsaurer Lösung einen gelben kristallinischen Niederschlag von Natriumkobaltihexanitrit

$$CoCl_2 + 7KNO_2 + 2C_2H_4O_2 = 2KCl + H_2O + NO + 2C_2H_3O_2K + [Co(NO_2)_6]K_3$$

(Unterschied vom Nickel.)

7b) Quantitative Analyse. Bestimmung als Metall. Man fällt die Kobaltlösung am besten in einer Porzellanschale siedend heiß mit reiner Kalilauge und Bromwasser, filtriert das Kobalt(III)hydroxyd, trocknet, glüht im Wasserstoffstrom und wägt nach dem Erkalten als Metall. Eventuell extrahiert man nach dem Glühen noch mit Wasser, um mitgerissenes Alkali zu entfernen, und wiederholt das Ausglühen im Wasserstoffstrom.

7c) Elektroanalyse. Sehr bequem läßt sich das Kobalt elektrolytisch bestimmen. Man verwandelt das zu bestimmende Metall (0,1 bis 0,2 g) durch Abdampfen mit wenig verdünnter Schwefelsäure in das Sulfat und verdünnt unter Zugabe von 5 g Ammoniumsulfat, 30 ccm konzentriertem Ammoniak und 1 g Natriumacetat auf 150 ccm. Hierauf elektrolysiert man bei Zimmertemperatur entweder bei ruhender Elektrolytflüssigkeit mit einer Stromstärke von 0,5 bis 1 Ampere oder aber unter Rührung, die mechanisch oder nach Frary elektromagnetisch bewirkt werden kann, mit 4 Ampere unter Benutzung einer Cl. Winklerschen Drahtnetzelektrode. Im ersteren Falle dauert die Elektroanalyse 3 Stunden, im letzteren Falle ca. 25 Minuten. Das Kobalt scheidet sich fest haftend als graues Metall an der Kathode ab, die nacheinander mit Wasser, Alkohol und Aether gewaschen und sodann getrocknet und gewogen wird.

8. Spezielle Chemie. 8a) Allgemeines Verhalten des Metalls. Das reine Metall ist bei gewöhnlicher Temperatur in trockener Luft oder Sauerstoff beständig, oxydiert

Digitized by Google

sich jedoch leicht in der Glühhitze. Reduziert man Kobaltoxyd bei Temperaturen von ca. 250° im Wasserstoffstrom, so besitzt das erhaltene Metall pyrophorische Eigenschaften. Wasserstoff wird von Kobaltpulver nur schwer absorbiert. Bei 700° ist die Absorption erst meßbar und erreicht bei 1000° den Wert 0.4 Volumina. Wasserdampf wird bei Rotglut zersetzt. Während Kobalt zur Vereinigung mit elementarem Stickstoff selbst oberhalb des magnetischen Umwandlungspunktes bei 1050° keine Neigung besitzt, absorbiert es in der Kälte bereits große Mengen Stickstoffdioxyd und bildet die Verbindung Co_2NO_2. Erhitzt man feinverteiltes Kobalt in einer Kohlenoxyd-Atmosphäre unter 100 Atmosphären Druck auf 150 bis 200°, so kann man orangefarbene Kristalle der Zusammensetzung $Co(CO)_4$ isolieren, die bei 42° bis 46° unter Zersetzung schmelzen. Bei hohen Temperaturen zerlegt Kobalt katalytisch das Kohlenoxyd nach der Gleichung $2Co = C + CO_2$. — Das Kobalt, welches unedler als Wasserstoff ist, löst sich langsam in kalter Salzsäure und Schwefelsäure auf, schneller bei Gegenwart von Platin, wahrscheinlich infolge Bildung von „Lokalelementen", ähnlich wie beim Zink. Verdünnte Salpetersäure bleibt in der Kälte ohne Einwirkung, konzentrierte Säure greift das Metall stark an. Unter bestimmten Bedingungen tritt die Erscheinung der Passivität auf. Gegen Kalilauge ist das Metall auch in der Hitze sehr beständig. Setzt man das Metall als Anode in alkalischer Lösung der Wirkung des elektrischen Stromes aus, so geht es, am besten bei Anwendung kleiner Stromdichten, in seiner niedrigsten Oxydationsstufe (CoO) kolloidal mit blauer Farbe in Lösung. Trotz der großen Aehnlichkeit mit dem Nickel unterscheidet sich das Kobalt von ihm durch die größere Beständigkeit seiner Oxyd(III)verbindungen, die in Form von Komplexverbindungen eine große Rolle spielen und auf deren Bildung wichtige Trennungen beider Metalle beruhen. Die wasserhaltigen Salze sind karmoisinrot, die wasserfreien lila bis blau gefärbt. Beim starken Erhitzen verlieren die Salze ihre Säure, falls dieselbe flüchtig ist, und gehen in Oxyde über.

8b) Verbindungen mit Sauerstoff und mit Schwefel. — Von den existenzfähigen Oxyden besitzen die folgenden Bedeutung.

Kobalt(II)oxyd, Kobaltoxydul, CoO, stellt ein graugrünes, an der Luft unveränderliches, unmagnetisches Pulver dar. Es entsteht beim Glühen des Metalls im Wasserdampfstrom oder beim Glühen des Hydroxyds oder Carbonats in indifferenter Atmosphäre. Bei Weißglut ist allein CoO beständig. Von Säuren wird es zu Kobalt(II)salzen gelöst. Das entsprechende Hydroxyd $Co(OH)_2$ ist ein rosagefärbter Niederschlag, welcher aus Kobalt(II)salzen mit Kalilauge entsteht und durch Oxydationsmittel wie Brom in schwarzes $Co(OH)_3$ übergeführt wird.

Kobalt(II u. III)oxyd, Kobaltoxyduloxyd, Co_3O_4, bildet sich beim Rotglühen von Kobalt(II)oxyd, Kobalt(II)hydroxyd, Kobalt(II)carbonat, -nitrat oder -oxalat an der Luft oder in Sauerstoff. Es ist ein schwarzes Pulver und bildet kristallisiert stahlglänzende, mikroskopische Oktaeder. Bei Weißglut geht es unter Sauerstoffentwickelung in CoO über. In Säuren ist es, mit Ausnahme von konzentrierter H_2SO_4, unlöslich.

Kobalt(III)oxyd, Co_2O_3, entsteht durch gelindes Glühen von entwässertem Kobaltnitrat und bildet ein braunschwarzes Pulver. Durch Oxydation von Kobaltsalzen, namentlich in alkalischer Lösung, erhält man hydratisiertes Co_2O_3 von wechselnder Zusammensetzung. Alle diese Oxyde lösen sich in Säuren unter Sauerstoffentwickelung, in Salzsäure speziell unter Chlorentwickelung, da $Co^{\cdots}$-Jon in wässeriger Lösung ganz unbeständig ist (vgl. Abschnitt 6 „Elektrochemie").

Kobaltige Säure, H_2CoO_3. Durch Versetzen von Kobalt(II)lösung mit Natriumcarbonat und Wasserstoffsuperoxyd erhält man grüne Lösungen, in denen wahrscheinlich Derivate der kobaltigen Säure, H_2CoO_3, abgeleitet vom Oxyd CoO_2, enthalten sind.

Kobaltsulfid. Durch Einwirkung von Schwefel oder Schwefelwasserstoff auf glühendes Metall oder Kobaltoxyde entstehen Sulfide wechselnder Zusammensetzung. Durch Fällen einer Kobaltsalzlösung mit Schwefelammon entsteht hydratisiertes CoS, welches merkwürdigerweise in verdünnten Säuren unlöslich ist (vgl. NiS, Qualitative Analyse). Von konzentrierter Salpetersäure oder Königswasser werden alle Kobaltsulfide gelöst.

8c) Salze des zweiwertigen Kobalts, Kobaltoverbindungen.

Kobalt(II)chlorid, Kobaltchlorür, $CoCl_2$, erhalten durch Einwirkung von Chlor auf Metall oder bequemer durch Lösen von metallischem oder oxydiertem Kobalt (CoO od. Co_2O_3) in Salzsäure ist als wasserfreies Salz blau gefärbt. Die Lösung besitzt, entsprechend der Farbe des $Co^{\cdot\cdot}$Ions, rote Färbung. Auch das aus wässeriger Lösung mit 6 Mol H_2O kristallisierende Salz bildet rote gefärbte Prismen, geht jedoch in trockener Luft in das violette Hydrat $CoCl_2.2H_2O$ über. 100 g gesättigte Lösung enthalten bei 25° 34,4 g wasserfreies Salz. Wie aus der Löslichkeitskurve ersichtlich ist, erfolgt bei 25° Umwandlung des 6-Hydrats in 2-Hydrat, bei 50° Umwandlung in wasserfreies Salz. Durch Zusatz von Salzsäure oder von Chloriden wie $CaCl_2$ oder LiCl zu der wässerigen Lösung tritt Farbenumschlag in Blau ein, offenbar infolge von Bildung

Digitized by Google

der blau gefärbten Anionkomplexe $CoCl_3'$ bezw. $CoCl_4''$. $CoCl_2$ ist auch in vielen organischen Lösungsmitteln löslich.

Kobalt(II)bromid, $CoBr_2$, und Kobalt(II)jodid, CoJ_2, können direkt durch Vereinigung von gepulvertem Kobalt mit Brom bezw. Jod in der Hitze erhalten werden. $CoBr_2$ bildet wasserfrei glänzende, grüne Kristallblättchen, die sich in Wasser mit roter Farbe lösen. Verdunstet man die Lösung vorsichtig, so bekommt man das 6-Hydrat als rote, bei 100° schmelzende Kristallmasse. Aus der Schmelze entweicht Wasser, und beim Erkalten hinterbleibt das 2-Hydrat als purpurblaue Masse. Bei 130° entweichen die letzten beiden Moleküle Wasser und man erhält wieder das grüne Salz $CoBr_2$. Kobalt(II)-jodid bildet wasserfrei eine graugrüne, schmelzbare Masse, die sich in wenig Wasser grün, in viel Wasser rot auflöst. Aus der Lösung können durch vorsichtiges Abdunsten die grüngefärbten 2- und 4-Hydrate bezw. die rotgefärbten, sehr unbeständigen 6- und 9-Hydrate gewonnen werden.

Kobalt(II)sulfat, $CoSO_4 + 7H_2O$ bildet sich beim Auflösen von Kobalt in Schwefelsäure und kristallisiert in luftbeständigen, roten, monoklinen Prismen, die beim Erhitzen Kristallwasser verlieren und beim starken Glühen auch Säure abgeben. 100 g gesättigte Lösung enthalten bei 20° 26,58 g wasserfreies Salz. Außer dem 7-Hydrat existieren noch eine Reihe anderer Hydrate. Ueber die Umwandlung in Kobalt(III)sulfat vgl. Abschnitt 6 „Elektrochemie“. Auch zur Bildung von Alaunen ist das Kobalt(III)-sulfat befähigt.

Kobalt(II)nitrat, $Co(NO_3)_2 + 6H_2O$ entsteht durch Lösen von metallischem Kobalt oder dessen Hydroxyd bezw. Carbonat in Salpetersäure und kristallisiert in monoklinen Kristallen, die bei 56° schmelzen und in das Trihydrat übergehen. Weitere Wasserabspaltung ist mit gleichzeitiger Zersetzung verbunden. 100 g der bei 18° gesättigten Lösung enthalten 49,73% wasserfreies Salz.

Kobalt(II)orthosilikat erhält man durch mehrstündiges Erhitzen eines innigen Gemisches von CoO und $CoCl_2$ mit einem großen Ueberschuß von amorphem SiO_2 auf Rotglut. Es hinterbleibt nach dem Extrahieren mit KOH und H_2O als ein blauviolettes Pulver. Das Kalium- oder Natriumkobalt(II)orthosilikat ist der färbende Bestandteil der in der Keramik als blauer Farbstoff verwendeten Smalte.

Kobaltcarbonate existieren in mannigfachen Zusammensetzungen. Das normale hellrote $CoCO_3$ verliert schon bei geringem Erhitzen Kohlensäure und geht in Co_3O_4 über.

Kobaltaluminat entsteht durch Glühen von Al_2O_3 mit Kobaltnitrat und ist bekannt unter dem Namen Thénards Blau.

Kobalt(II)oxyd-Zinkoxyd, erhalten durch Glühen von Zinkoxyd mit Kobaltoxyd, bildet das sogenannte Rinmanns Grün.

8d) Komplexe Verbindungen. Von großer Bedeutung, praktisch sowohl wie theoretisch, sind die komplexen Kobaltverbindungen. Während die vom zweiwertigen Metall sich ableitenden Komplexverbindungen wie beim Nickel infolge ihrer Unbeständigkeit von untergeordneter Bedeutung sind, bilden diejenigen des dreiwertigen Metalls wichtige, überaus beständige, schön gefärbte Verbindungen. Die Koordinationszahl, d. h. die Maximalzahl der Moleküle (Ionen + Neutralteile), welche das Zentralion zu binden vermag, beträgt sechs.

Kobaltamminverbindungen. Von allen Ammoniakmetallen sind die Kobaltsalze am vollkommensten studiert worden. Die Konstitution der Hexamminkobaltsalze, die durch Einwirkung von Ammoniak auf Kobaltsalze bei Gegenwart von Sauerstoff entstehen, entspricht der Strukturformel: $[Co(NH_3)_6]X_3$, wo X einen Säurerest wie Cl', NO_3', NO_2', SCN' usw. bedeutet, NH_3 durch Pyridin, Aethylendiamin, H_2O und andere Reste ersetzt werden kann. Aus dieser Reihe sind naturgemäß (vgl. „Platin“ im Artikel „Osmiumgruppe“) wiederum am interessantesten die Tetrammin- und die Diamminverbindungen vom Typus $\left[Co{<}^{X_2}_{(NH_3)_4}\right]X$ und $\left[Co{<}^{X_4}_{(NH_3)_2}\right]Me$ (Me = einwertiges Metall), da sie beide in zwei stereoisomeren Formen existieren können. Die physikalischen Unterschiede dieser Verbindungen kommen schon charakteristisch durch die verschiedenartigen Färbungen zum Ausdruck, indem die Salze der cis(1.2)-Reihe (vgl. den Artikel „Platin“) rotgelb bis violett (Flavo- und Violeoreihe) und die trans(1.6)-Salze gelb bis grünblau (Croceo- und Praseoreihe) gefärbt sind.

Eine Bestätigung der Koordinationslehre (s. den Artikel „Valenzlehre“) ist neuerdings durch das Studium der (Aethylendiamin enthaltenden Komplexverbindungen erbracht worden, indem es nämlich Werner gelungen ist, Verbindungen wie die 1.2-Chloroammindiäthylendiaminkobaltisalze oder die 1.2-Dinitrodiäthylendiaminkobaltisalze mittels Bromkampfersulfosäure in die optischen Antipoden zu spalten. Die optische Aktivität ist hier durch das Auftreten zweier Spiegelbildisomeren in der cis-Reihe bedingt.

Kobaltinitritoverbindungen. In dieser Gruppe interessieren neben den stereoisomeren cis- und trans-Dinitrotetramminkobaltiverbindungen (Flavo- bezw. Croceosalze) und ihren Derivaten namentlich die sich von der Hexanitritokobaltiwasserstoffsäure ableitenden Alkalisalze z. B. das $K_3[Co(NO_2)_6]$ wegen ihrer Bedeutung für die analytische Chemie (s. Absatz 7, qualitative Analyse).

Digitized by Google

Kobalticyanverbindungen. Auch von diesen Verbindungen besitzen die bereits im Abschnitt „Analytische Chemie“ erwähnten das komplexe Kobalticyanion $[Co(CN)_6]'''$ enthaltenden Alkalisalze Bedeutung, da das Kobalt hier in wässeriger Lösung in keiner Weise durch Fällungsreaktionen nachweisbar und hierdurch eine Trennung des Nickels vom Kobalt gegeben ist.

9. Thermochemie. Bildungswärmen der wichtigsten Kobaltverbindungen für je 1g-Mol. in g-Kalorien:

	Bildungswärme
$CoCl_2$	76 500 cal
$CoBr_2$, Aqua*)	72 900 ,,
CoJ_2, Aqua	42 500 ,,
CoO	63 800 ,,
$Co(OH)_2$	63 400 ,,
$Co(OH)_3$	74 700 ,,
CoS, xH_2O	21 700 ,,
$CoSO_4$, Aqua	230 500 ,,
$CoSO_4 \cdot 7H_2O$	234 050 ,,
$Co(NO_3)_2$, Aqua	114 400 ,,
$Co(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$	119 300 ,,

*) Aqua bedeutet wässrige Lösung.

10. Spektralchemie. Kobaltsalze liefern kein verwendbares Flammenspektrum, dagegen erhält man mit Hilfe des einfachen elektrischen Funkens ein charakteristisches, linienreiches Spektrum, aus dem folgende Linien hervorzuheben sind: Hellgrüne Linie 564,1, grüne Linien *548,3*, [*535,3*, *534,0*], [*528,0*, *526,7*], 521,2, 515,4, blaue Linien *486,8*, *484*, 481,5, 479,3, eine indigoblaue Linie 453,3, und eine violette Linie 411,9. Die kursiv gedruckten Linien sind besonders deutlich zu beobachten.

Die übrigen Linien siehe bei J. M. Eder und E. Valenta, Atlas typischer Spektren, 2 Teile, herausgegeben von der Kaiserl. Akad. d. Wissenschaften, Wien 1911, und in der Neuauflage der Wellenlängentabellen von Exner und Haschek, Leipzig und Wien 1911, Franz Deuticke.

Die Lösungen der einfachen Kobaltsalze liefern kein sehr charakteristisches Absorptionsspektrum, wohl aber alkoholische oder salzsaure Lösungen von Kobalt(II)-chlorid. Besonders geeignet zur spektralanalytischen Untersuchung sind die komplexen Kobaltrhodanide, von denen die grünlichblauen amylalkoholischen Lösungen durch charakteristische Absorptionsstreifen ausgezeichnet sind.

Literatur s. unter „Nickel“.

F. Sommer.

c) Nickel.

Ni. Atomgewicht 58,68.

1. Atomgewicht. 2. Vorkommen. 3. Geschichte. 4. Darstellung und Verwendung. 5. Physikalische Eigenschaften und Konstanten. 6. Valenz und Elektrochemie. 7. Analytische Chemie. 8. Spezielle Chemie. 9. Thermochemie. 10. Spektralchemie. 11. Kolloidchemie.

1. Atomgewicht. Das Atomgewicht des Nickels besitzt den Wert nach der Atomgewichtstabelle für das Jahr 1912 58,68.

2. Vorkommen. In gediegenem Zustande findet sich Nickel im Meteoreisen, welches 2 bis 8% enthält. Ferner kommt es in Verbindung mit Schwefel und Arsen namentlich im Erzgebirge vor und bildet mit diesen Elementen den Nickel- oder Haarkies NiS, das Arsennickel NiAs, auch Rotnickelkies oder Kupfernickel genannt, das Weißnickelerz $NiAs_2$, den Nickelglanz oder Gersdorffit $NiS_2 + NiAs_2$, ferner die Nickelblüte $Ni_3As_2O_8 + 8H_2O$, ein Zersetzungsprodukt der nickelhaltigen Kiese. Auch existieren Verbindungen, in denen an Stelle von Arsen das Antimon getreten ist. Das technisch wichtigste Erz ist der Garnierit, ein wasserhaltiges Nickelsilikat, das mit Magnesiumsilikaten gemengt ist und hauptsächlich bei Noumea auf Neukaledonien, ferner auch in Oregon gefunden wird. Ein weiteres reiches Nickellager ist das von Sudbury in Kanada, wo nickelhaltiger Magnet- und Kupferkies vorkommt. Als Begleiter enthalten die Nickelverbindungen meist die analogen Kobaltverbindungen.

3. Geschichte. In den ältesten Zeiten verwendeten die Chinesen bereits das Nickel zur Herstellung von Packfong, einer dem Neusilber entsprechenden Cu,Zn,Ni-Legierung. In Europa wurde das Nickel im Jahre 1751 von Cronstedt im Arsennickel entdeckt und als neues Metall erkannt. Die Verhüttung der Erze, die erst im Jahre 1824 versucht wurde, begann in großem Maßstabe erst vor ungefähr 35 Jahren seit der Auffindung der Nickelerze in Neukaledonien und Kanada.

4. Darstellung und Verwendung. Während die Darstellung des Nickels im kleinen keine Schwierigkeiten bereitet — die Reduktion der Oxyde durch Wasserstoff oder mittels Kohle, ferner starkes Glühen von oxalsaurem Nickel führen leicht zum Metall —, ist die technische Verarbeitung ein schwieriger und verwickelter Prozeß. So wurde reines Nickel überhaupt erst seit Entdeckung der Garnieritlager hergestellt. Der Gang des Garnieritprozesses ist folgender. Durch eine Art Hochofenbetrieb werden die gerösteten Silikate mit Koks und Zuschlägen reduziert und verschmolzen. Das so erhaltene kohle-, silicium- und eisenhaltige Rohnickel wird in einem Bessemer Converter oder Martin-Siemensofen verblasen, wobei die Kohle verbrennt und das Eisen und Silicium verschlackt. Das zugleich oxydierte Nickel muß weiter reduziert werden. Elektrolytisch läßt sich aus Nickelammoniumsulfatlösungen leicht ganz reines Metall abscheiden.

Digitized by Google

Die Verwendung des Metalls ist eine mannigfaltige. In Verbindung mit Kupfer (75% Cu + 25% Ni) wird es als Münzmetall für Nickelgeld verwendet. Das Neusilber oder auch Argentan, Alfenide, Alpacca genannt, besteht aus Kupfer, Nickel und Zink und enthält diese Metalle durchschnittlich im Verhältnis 5:2:2. Einen ungeheuren Verbrauch an Nickel bedingt die Nickelstahlfabrikation mit 2 bis 8% Nickel für Panzerplatten. Die Nickelstahle besitzen eine Zähigkeit, die doppelt so groß wie die des gewöhnlichen Stahles ist. Bemerkt sei an dieser Stelle, daß ein Nickelstahl von 36% Ni einen Ausdehnungskoeffizient $< 0{,}000002$ besitzt, und unter dem Namen Inwar zur Herstellung von Präzisionsinstrumenten verwendet wird. Eine weitere Verwendung findet das Reinnickel zur Herstellung von Kochgeschirren, doch ist diese Art der Verwendung nicht unbedenklich bei der Angreifbarkeit des Metalls durch saure oder stark gesalzene Speisen, wenn man die physiologische Wirksamkeit der giftigen Nickelsalze bedenkt. Jedenfalls dürfen nur erstklassige Fabrikate verwendet werden. Auch galvanisch vernickelte Gefäße besitzen, da Nickel auf Eisen, Kupfer, Zink und auch Messing gut haftet, technische Bedeutung.

5. **Physikalische Eigenschaften und Konstanten.** Das Nickel ist ein stark glänzendes, silberweißes, leicht magnetisierbares Metall von großer Zähigkeit und Dehnbarkeit, sodaß es zu stannioldünnen Platten verarbeitet und zu haarfeinem Draht gezogen werden kann. Das Metall ist strengflüssig wie Stabeisen und läßt sich wie dieses schmieden, schweißen und walzen. Der Schmelzpunkt liegt bei 1435°. Das Metall besitzt bei 360.8° einen Umwandlungspunkt, bei welchem es in eine unmagnetische Modifikation übergeht. Nickel verflüchtigt sich bei der Temperatur des Knallgasgebläses und kann unter Anwendung starker elektrischer Ströme leicht destilliert werden.

Physikalische Konstanten.

Das spezifische Gewicht beträgt für geschmiedetes Nickel $D_4^{15} = 8{,}82$ bis $8{,}93$ je nach der Darstellungsweise des Metalls. Die Härte ist nach der Mohsschen Skala 3,8. Der lineare Ausdehnungskoeffizient beträgt zwischen 0 und 300°: $\alpha_t = 10^{-8}\,(1280 + 0{,}75t + 0{,}0035\,t^2)$. Die spezifische Wärme besitzt für das Intervall —185° bis +20° den Wert 0,0918, für 15° bis 100° den Wert 0,10842. Die elektrische Leitfähigkeit beträgt bei 0° $14{,}42 \times 10^4$.

6. **Valenz und Elektrochemie.** Das Nickel ist ein vorwiegend zweiwertiges Metall. Die Zweiwertigkeit kommt vor allem in der Isomorphie seines Sulfats mit dem Magnesiumsulfat, ferner in der seines Chlorids und Nitrats mit den entsprechenden Kobalt(II)-salzen zum Ausdruck. Dreiwertig ist das Nickel im Ni_2O_3, Nickel(III)oxyd, von dem jedoch bis jetzt noch keine Salze bekannt sind. Nickelperoxyd, NiO_2, welches in zwei isomeren Formen vorkommt, repräsentiert in der Form des schwarzen Oxyds vielleicht vierwertiges Nickel. Da das Nickel in Salzform ein streng zweiwertiges Metall vorstellt, hat man es in Lösung nur mit dem grün gefärbten $Ni^{\cdot\cdot}$-Ion zu tun. Die Farbe der dunkelroten Lösungen, die beispielsweise durch Einwirkung von Ozon auf mit Nickelsalz versetzte Kaliumbicarbonatlösung oder durch anodische Auflösung von Nickel entstehen, stammt nicht von gebildeten Nickel(III)-verbindungen, also $Ni^{\cdot\cdot\cdot}$-Ionen, sondern stellt eine kolloidale Lösung von NiO_2 vor. Nickel(II)salze sind in wässeriger Lösung schwach hydrolysiert. $NiSO_4$ nach dem Schema: $Ni^{\cdot\cdot} + 2OH' \rightleftarrows Ni(OH)_2$, Nickelchlorid dagegen in folgender Weise:

$$NiCl^{\cdot} + OH' \rightleftarrows Ni\langle{}^{Cl}_{OH}$$

Das dem Vorgang $Ni \rightarrow Ni^{\cdot\cdot}$ entsprechende Normalpotential (bezogen auf die Einheitskonzentration — 1 g Formelgewicht im Liter — die Normalwasserstoffelektrode als Nullpunkt) beträgt — 0,22 Volt. Das Vorzeichen entspricht der Ladung der Elektrode.

Wie das Kobalt, kommt auch Nickel, allerdings nur in zweiwertiger Form, als komplexes Ion vor. $[Ni(NH_3)_6]^{\cdot\cdot\cdot\cdot}$, $[Ni(CN)_4]''$ sind die bekanntesten Beispiele.

7. **Analytische Chemie.** a) Qualitative Analyse. Mit Kohle und Soda vor dem Lötrohr erhitzt, geben Nickelverbindungen magnetische Metallflitterchen.

Perlreaktionen. In der Phosphorsalzperle geben Nickelverbindungen in der Oxydations- und Reduktionsflamme fast gleiche Färbungen, in der Hitze eine dunkelrote, in der Kälte je nach Konzentration eine gelbbraune bis grünlichgelbe. In der Boraxperle liefert namentlich die obere Reduktionsflamme metallisches Nickel, so daß die Perle farblos erscheint.

Reaktionen auf Nickel(II)salze bezw. auf $Ni^{\cdot\cdot}$-Ionen.

Schwefelammon gibt einen schwarzen Niederschlag von NiS, der in Essigsäure und 4% kalter Salzsäure unlöslich, in konzentrierter Salpetersäure und Königswasser leicht löslich ist.

$$NiCl_2 + (NH_4)_2S = NiS + 2NH_4Cl$$

Das bei dieser Fällung leicht in kolloidaler Form in Lösung gehende NiS kann am besten durch Zusatz von Essigsäure und längeres Aufkochen ausgeflockt werden.

Da NiS in 4% Salzsäure praktisch unlöslich ist, so sollte es eigentlich auch aus saurer Lösung durch Schwefelwasserstoff ge-

Digitized by Google

fällt werden. Der Grund liegt wahrscheinlich in einer außerordentlichen Trägheit der Fällung, also einer charakteristischen Uebersättigungserscheinung.

Natronlauge fällt grünes, im Ueberschuß des Fällungsmittels unlösliches Nickel(II)hydroxyd, das sich an der Luft nicht verändert.

$$NiCl_2 + 2NaOH = Ni(OH)_2 + 2NaCl$$

Durch Brom, Chlor oder unterchlorige Säure wird es zu schwarzem Nickel(III)hydroxyd oxydiert.

$$2Ni(OH)_2 + O + H_2O = 2Ni(OH)_3$$

Ammoniak fällt in neutralen, ammonsalzfreien Lösungen grünes basisches Salz, das sich in überschüssigem Ammoniak oder Ammoniumchlorid unter Komplexsalzbildung mit blauer Farbe löst

$$Ni\begin{matrix} \diagup OH \\ \diagdown Cl \end{matrix} + 5NH_3 + H_2O = [Ni(NH_3)_6](OH)_2 + NH_4Cl$$

Natrium- oder Kaliumcarbonat fällen apfelgrünes Nickelcarbonat.

Cyankalium erzeugt eine hellgrüne Fällung von Nickel(II)cyanid, die sich im überschüssigen Fällungsmittel zu dem gelben Kaliumsalz der komplexen Nickel(II)cyanwasserstoffsäure löst.

$$Ni(CN)_2 + 2KCN = K_2[Ni(CN)_4]$$

Aus dieser beim Kochen sich nicht verändernden Lösung wird zum Unterschied von Kobalt durch Natronlauge und Brom schwarzes Nickel(III)hydroxyd abgeschieden.

α-Dimethylglyoxim: $\begin{matrix} CH_3.C=NOH \\ | \\ CH_3.C=NOH \end{matrix}$

(Tschugaeffs Reagenz) gibt in essigsaurer oder ammoniakalischer Lösung eventuell erst beim Aufkochen noch bei einer Verdünnung von 1:400000 einen voluminösen roten Niederschlag von:

$$\begin{matrix} CH_3.C=NO-Ni-ON=C.CH_3 \\ | \qquad\qquad\qquad\qquad | \\ CH_3.C=NOH \quad HON=C.CH_3 \end{matrix}$$

(Unterschied von Kobalt).

Sind bei Ausführung dieser Reaktion viel Kobalt(II)salze zugegen, so führt man diese erst durch Ammoniak und Wasserstoffsuperoxyd in Kobalt(III)amminsalze über, zerstört das überschüssige H_2O_2 durch Kochen und fällt erst jetzt mit dem Reagenz. So läßt sich 0,1 mg Nickel in Gegenwart von 500 mg Kobalt noch nachweisen.

Dicyandiamidinsalz fällt bei Gegenwart von überschüssiger Kalilauge alles Nickel als Dicyandiamidinnickel: $(C_2H_5N_4O)_2.Ni + 2H_2O$ in Form von feinen gelben Nadeln, die in ammoniakhaltigem Wasser quantitativ unlöslich sind. Unterschied von Kobalt. Größere Mengen von Ammonsalzen sind, da sie lösend wirken, bei der Fällung zu vermeiden (siehe auch unter quantitativer Analyse).

b) Quantitative Analyse. α) Bestimmung als Nickeldimethylglyoxim. Zu der siedend heißen neutralen, höchstens ganz schwach sauren, Nickelsalzlösung, die nicht mehr als 0,1 g metallisches Ni auf 200 ccm enthalten soll, setzt man etwa die fünffache Menge Dimethylglyoxim in Form 1 prozentiger alkoholischer Lösung, macht ganz schwach ammoniakalisch und filtriert am besten durch einen Neubauer-Platintiegel. Man wäscht mit heißem Wasser aus und trocknet bei 110° bis 120°. Man wägt: $NiC_8H_{14}N_4O_4$.

β) Bestimmung als Dicyandiamidinnickel. Man setzt zu der möglichst neutralen kalten Nickelsalzlösung auf zirka 0,1 g Nickel 2 g Dicyandiamidinsulfat, welches in heißem Wasser gelöst ist. Hierauf fügt man einige ccm Chlorammonlösung und reichlich Ammoniak hinzu, worauf man unter ständigem Umrühren mit überschüssiger 10 prozentiger Kalilauge bis zum Farbenumschlag von blau in gelb versetzt. Der sich in feinen Nadeln absetzende Niederschlag wird noch einige Stunden stehen gelassen, sodann am besten durch einen Goochtiegel filtriert, mit ammoniakhaltigem Wasser gewaschen und bei 115° getrocknet. Man wägt fleischfarbenes $(C_2H_5N_4O)_2Ni$. Beide Methoden (α und β) fällen Kobalt nicht aus.

c) Elektroanalyse. Die elektroanalytische Bestimmung des Nickels kann unter ganz denselben Bedingungen wie die des Kobalts vorgenommen werden (vgl. „Kobalt", Elektroanalyse).

8. Spezielle Chemie. 8a) Allgemeines Verhalten des Metalls. Reines Metall ist bei gewöhnlicher Temperatur an der Luft unveränderlich, überzieht sich jedoch beim Erhitzen in Luft oder Sauerstoff mit einer Schicht von NiO, wobei gleichzeitige Anwesenheit von Feuchtigkeit die Oxydationsgeschwindigkeit begünstigt. Fein verteiltes Metall besitzt, bei möglichst niederer Temperatur durch Reduktion mittels Wasserstoff gewonnen, pyrophorische Eigenschaften, verliert dieselben jedoch, wenn es einige Zeit im Wasserstoffstrom auf höhere Temperaturen erhitzt wird. Wird poröses Metall längere Zeit als Kathode in angesäuertem Wasser behandelt, so werden beträchtliche Mengen Wasserstoff absorbiert. Wasserstoffabsorption tritt auch direkt beim Erhitzen in einer H_2-Atmosphäre ein, und zwar beginnt sie bereits unterhalb 200°, nimmt mit der Temperatur zu und beträgt bei 1000° rund 1 Volumen. Wie beim Platin erfolgt auch hier die Absorption nicht nach dem einfachen Henryschen Gesetz, sondern sie

Digitized by Google

ist der Quadratwurzel aus dem Wasserstoffdruck proportional. Ammoniak wird von fein verteiltem Nickel bereits bei mäßiger Hitze in Stickstoff und Wasserstoff zersetzt; Neigung zur Nitridbildung scheint wie beim Kobalt nicht vorhanden zu sein. Interessant ist das Verhalten von fein verteiltem reduziertem Nickel gegen Kohlenoxyd. Zwischen 30° und 60° verbinden sich beide, besonders leicht unter Druck, zu dem sehr flüchtigen Nickeltetracarbonyl, einer farblosen, leichtbeweglichen, sehr giftigen, bei 43° siedenden Flüssigkeit, die schon bei 155° in umkehrbarer Reaktion wieder in ihre Komponenten zerfällt. Auf diesem Verhalten beruht der Mondsche Prozeß zur Darstellung von reinem Nickel. Bei hohen Temperaturen spaltet Nickel Kohlenoxyd katalytisch in Kohle und Kohlensäure. Von Wasser ist Nickel auch in feinster Verteilung unangreifbar. Nickel löst sich nur langsam in verdünnter Phosphorsäure, Schwefelsäure und Salzsäure unter H_2-Entwickelung zu den entsprechenden zweiwertigen Salzen auf. Auch konzentrierte Schwefelsäure greift das Metall nur sehr schwierig an. Leicht löslich ist es in verdünnter Salpetersäure; kalte konzentrierte Salpetersäure macht das kompakte Metall passiv. Gegen Kalilauge ist Nickel, auch in der Hitze, sehr beständig. Nickelbleche finden daher als Elektroden im Knallgascoulometer, in dem aus der Menge des aus Natronlauge entwickelten Wasserstoff-Sauerstoffgemenges die Stromstärke bestimmt wird, vielfach Verwendung.

Fein verteiltes Nickel katalysiert in hohem Maße eine Reihe von Reduktionsprozessen, und spielt deshalb namentlich in der organischen Chemie eine gewisse Rolle. Bei Temperaturen oberhalb 250° beschleunigt Nickel zum Beispiel die Bildung von CH_4 aus Kohlenstoff und Wasserstoff, ferner die Reduktion von Aldehyd zu Alkohol, auch der Uebergang von der aromatischen in die sogenannte hydroaromatische Reihe vollzieht sich in vielen Fällen leicht und gestattet die Synthese von Verbindungen, die sonst schwer zugänglich waren.

8b) Verbindungen mit Sauerstoff und Schwefel.

Nickel(II)oxyd, Nickeloxydul, NiO, entsteht beim Glühen von Nickel(II)hydroxyd oder Carbonat unter Sauerstoffabschluß und bildet ein grünlich graues, säurelösliches, unmagnetisches Pulver. Es ist wie CoO bei hohen Temperaturen das einzig beständige Oxyd, da bei anhaltendem Glühen sämtliche Oxyde in NiO übergehen.

Nickel(II)hydroxyd, Nickelhydroxydul, $Ni(OH)_2$, durch Fällen eines Nickelsalzes mit Kali- oder Natronlauge erhalten, bildet einen gelatinösen, apfelgrünen Niederschlag, der sich in Ammoniak unter Komplexbildung löst. Die dabei auftretende Blaufärbung ist auf das Entstehen der positiv geladenen Ionen $Ni(NH_3)_4^{\cdot\cdot}$ resp. $Ni(NH_3)_6^{\cdot\cdot}$ zurückzuführen. In wässeriger Lösung spaltet das Hydrat beim Kochen kein Wasser ab, erst bei stärkerem trockenen Erhitzen bildet sich NiO.

Nickel(II, III)oxyd, Nickeloxyduloxyd, Ni_3O_4, kann durch Erhitzen von $NiCl_2$ im Sauerstoffstrom bei 350° bis 400° erhalten werden und stellt ein grauschwarzes Pulver dar, welches sich in Salzsäure unter Chlorentwickelung löst.

Nickel(III)oxyd, Ni_2O_3, bildet sich bei gelindem Erhitzen von fein gepulvertem Nickelnitrat als schwarzes Pulver, das durch anhaltendes starkes Glühen ebenso wie Ni_3O_4 in NiO übergeführt wird. In Salzsäure ist es unter Chlorentwickelung, in Schwefelsäure und Salpetersäure unter Sauerstoffentwickelung zu den gewöhnlichen Salzen des zweiwertigen Nickels löslich. Auch Ammoniak wirkt unter Stickstoffentwickelung lösend.

$Ni_2O_3.3H_2O$, das normale, unter Wasser dunkelbraun gefärbte Hydrat, bildet sich stets durch Zugabe von unterchlorig- oder unterbromigsauren Salzen zu Nickelsalzen bei Zimmertemperatur. Es verhält sich beim Lösen wie das Oxyd.

Nickeldioxyd, Nickelsuperoxyd NiO_2, kommt in zwei isomeren Modifikationen vor. Schwarzes Dioxyd entsteht am sichersten aus mit überschüssigem Kaliumcarbonat alkalisch gemachten Nickellösungen durch Oxydation mit Alkalihypobromit bei 0°. Die grüne Modifikation bildet sich entweder aus freiem Nickel(II)hydroxyd und Wasserstoffsuperoxyd oder besser aus dem aus alkoholischer $NiCl_2$-Lösung mittels KOH frisch gefällten Hydroxyd. Es besitzt grüngraue Farbe und hat ein pulveriges Aussehen. Die chemische Zusammensetzung ist $NiO_2.H_2O$. Das schwarze Dioxyd bildet im Edisonakkumulator den wesentlichen Bestandteil der Anode.

Von den Verbindungen des Nickels mit Schwefel existieren die folgenden: Ni_2S_3, NiS, Ni_3S_4, NiS_2, außerdem wahrscheinlich noch Ni_6S_5.

Das gewöhnliche hydratisierte Nickel(II)-sulfid, Nickelsulfür, NiS, erhält man leicht aus Nickelsalzlösungen durch Fällen mit Schwefelammon, wobei das NiS große Neigung zeigt, kolloidal in Lösung zu bleiben. Es ist in verdünnten Säuren sehr wenig löslich. Durch Zusammenschmelzen von Nickel und Schwefel unter Atmosphärendruck kann NiS nicht erhalten werden, da der Dampfdruck des Schwefels im NiS bei Schmelztemperatur größer als eine Atmosphäre ist. Von allen Schwefelverbindungen des Nickels ist nur Ni_3S_2 bei Schmelztemperatur beständig.

8c) Salze des Nickels. Von Salzen des Nickels kennt man nur Derivate des

Digitized by Google

zweiwertigen Metalls. Alle bisherigen Angaben über Nickel(III)salze beruhen auf Irrtümern.

Nickel(II)chlorid, Nickelchlorür, $NiCl_2$, entsteht wasserfrei durch Einwirkung von Chlor auf fein verteiltes Nickel. Die sehr lebhaft verlaufende Reaktion liefert gelbe, glänzende, dem Mussivgold ähnliche Kristallschuppen. Auch durch Abdampfen von in HCl gelöstem Nickel erhält man es als braungelbe Masse. Es sublimiert ohne zu schmelzen und löst sich mit grüner Farbe in Wasser. Auch in Alkohol ist $NiCl_2$ löslich. Von den Hydraten ist das grasgrüne 6-Hydrat dasjenige, welches bei Zimmertemperatur aus wässeriger Lösung stets auskristallisiert. In 100 Teilen Wasser lösen sich bei mittlerer Temperatur 60 g $NiCl_2 \cdot 6H_2O$.

Nickel(II)bromid, $NiBr_2$, durch Einwirkung von Bromdampf auf dunkelrot glühende Nickelfeile erhalten bildet nach dem Sublimieren je nach dem Aggregatzustand strohgelb bis bronzebraun gefärbte Schuppen. Es löst sich in Wasser, wie alle Nickelsalze, mit grüner Farbe.

Nickel(II)jodid, NiJ_2, kann durch Erhitzen von Nickelpulver mit Jod im evakuierten zugeschmolzenen Rohr bei 500° erhalten werden.

Von den Nickelsulfaten, die sich beim Auflösen von Metall in Schwefelsäure bilden, ist das dem Ferrosulfat entsprechende 7-Hydrat das wichtigste. Es bildet schön smaragdgrüne, mit Magnesiumsulfat isomorphe rhombische Kristalle. In 100 g Wasser lösen sich bei 15° 34,19 g $NiSO_4 \cdot 7H_2O$. Das Salz, welches an der Luft bereits verwittert, verliert bei gelindem Erhitzen sämtliches Kristallwasser und nimmt hellgelbe Farbe an. Es bildet mit Alkalisulfaten Doppelsalze, die mit $6H_2O$ kristallisieren. Das Ammonsulfat-Doppelsalz findet Verwendung bei der galvanischen Vernickelung. Als Anode dient dazu eine Platte aus reinem Nickel, die das auf dem zu vernickelnden Gegenstand abgeschiedene Nickel kontinuierlich nachliefert.

Nickel(II)nitrat, $Ni(NO_3)_2$, kristallisiert aus wässeriger Lösung in smaragdgrünen Kristallen. Eine bei 20° gesättigte Lösung enthält 49,06% $Ni(NO_3)_2$.

8d) Komplexe Verbindungen. Die komplexen Nickelverbindungen leiten sich, im Gegensatz zum Kobalt, nur vom zweiwertigen Metall ab, besitzen aber ihrer geringen Beständigkeit wegen keine Bedeutung. Zu erwähnen sind hier die bereits bei der qualitativen Analyse (Abschnitt 7) besprochenen Ammoniak- und Cyankomplexe.

9. Thermochemie. Bildungswärme der wichtigsten Nickelverbindungen für je 1 g-Mol. in g-Kalorien:

	Bildungswärmen
$NiCl_2$	74 500 cal
$NiBr_2$, Aqua*)	71 800 ,,
NiJ_2, Aqua	41 400 ,,
NiO	59 700 ,,
$Ni(OH)_2$	60 800 ,,
$NiS \cdot xH_2O$	19 400 ,,
$NiSO_4$, Aqua	229 400 ,,
$NiSO_4$, $7H_2O$	233 600 ,,
$Ni(NO_3)_2$, Aqua	113 200 ,,
$Ni(NO_3)_2$, $6H_2O$	120 700 ,,

*) Aqua bedeutet wässrige Lösung.

10. Spektralchemie. Nickelsalze geben in der Flamme kein brauchbares Spektrum, wohl aber unter Zuhilfenahme des elektrischen Funkens.

Die für das Nickel besonders charakteristischen Linien sind die grünen 547,7 und 508,1, ferner die blaue Linie 471,5. Die übrigen Linien findet man in den Wellenlängentabellen (Literatur siehe beim Kobalt, Spektralchemie).

Die wässrigen, grüngefärbten Lösungen von Nickelsalzen absorbieren den roten und violetten Teil des Spektrums. Aehnlich verhalten sich die grünen, alkoholischen Lösungen von Nickelchlorür. Die Auslöschungen der salzsauren und ammoniakalischen Lösungen sind wenig charakteristisch.

11. Kolloidchemie. Kolloidales Nickel, welches durch kathodische Zerstäubung von Eisen- oder Zinkdrähten mit elektrolytisch vernickeltem negativem Pol entsteht, bildet eine braunschwarze, ganz unbeständige, durch Elektrolytzusatz sofort koagulierende Flüssigkeit. Dieselbe Unbeständigkeit haftet auch den nach anderen Methoden dargestellten Solen an.

Literatur. *Gmelin-Kraut, Handbuch der anorganischen Chemie, Band V, Abt. 1. Heidelberg 1909.*

F. Sommer.

Eiszeiten.

1. Begriff und Wesen einer Eiszeit. 2. Verbreitung und Alter der Eiszeiten: a. Die quartäre Eiszeit: α) Das nordeuropäische Inlandeis. β) Gebirgsvergletscherung in Europa. γ) Das nordamerikanische Inlandeis. δ) Die übrigen Erdteile. ε) Die zeitlichen Beziehungen zwischen den quartären Vereisungen. b. Die spät-paläozoische Eiszeit: α) Verbreitung. β) Alter. c. Verbreitung und Alter der früh-paläozoischen und algonkischen Eiszeiten. 3. Geologische Wirkungen der Eiszeiten: a. Aufschüttungen: α) Erratische Geschiebe. β) Grundmoränen (Lokalmoränen, dünnbankige Absonderung, Steinpflaster). Geschiebemergel. Geschiebelehm. Geschiebesand.

Digitized by Google

Steinsohle. Tillit. γ) Endmoränen, Zungenbecken, Seenlandschaften. Drumlins. Steinströme. Solifluktion. δ) Schotterfelder. Hvitåbildungen. Sandr. Stauseen. Sedimente (Bänderton). Ose (Åsar). Fluviatile Sedimente, Löss. b. Erosionen: α) Glättung. Rundhöcker. Streifung. Scheuersteine (Facettengeschiebe). Riesentöpfe. Sölle. β) Uebertiefte Täler. Riegel. Fjorde. Kare. γ) Terrassen und Talfurchen. c. Schichtenstörungen. Stauchung. Ueberschiebung. Staumoränen. 4. Ursachen der Eiszeiten: α) Methodologische Vorbemerkung. β) Klima der Vereisungen. γ) Klima des Interglacials und der Schwankungen.

1. Begriff und Wesen einer Eiszeit. Als erkannt war, daß nicht allgemeine Ueberschwemmungen, sondern eine über das gegenwärtige Maß hinausgehende Ausdehnung der Gletscher für das ältere Quartär charakteristisch sei, stellte sich die Bezeichnung „Eiszeit" gleichbedeutend neben das bisher übliche „Diluvium". Späterhin zwang die Entdeckung anderer, älterer Vereisungen von mindestens gleichem Umfang dazu, dem Begriff „Eiszeit" die rein zeitliche Bedeutung zu nehmen und ihn anzuwenden zur Beschreibung eines Zustandes, der sich mehrfach wiederholt hat und noch jetzt in Grönland, der Antarktis und den höheren Gebirgen besteht. Der ursprüngliche, zeitliche Sinn tritt noch zuweilen hervor, aber stets bezeichnet man nur die unmittelbar oder mittelbar durch Vereisungen abgesetzten, niemals die gleichalten Bildungen anderer Entstehung und anderer Orte als eiszeitlich.

Die Anzeichen für vorzeitliche Vereisungen bestehen in Gesteinen und Oberflächenformen, die sich auch noch jetzt durch Gletscher herausbilden. Es sind lockere Anhäufungen des vom Eis transportierten Schuttes, ferner glaciale Erosionen, leicht zerstörbare Wirkungen also, die bei länger andauernder oder verstärkter Verwitterung und Abtragung unkenntlich werden. Eine größere Widerstandskraft besitzen, schon wegen ihrer Ausdehnung, die Grundmoränen, aber von älteren Eiszeiten sind auch sie nur erhalten, soweit sie durch bald nachfolgend aufgelagerte Gesteinsschichten oder durch Absinken an Verwerfungsspalten geschützt und der Erosion entzogen waren. Die heutige Begrenzung der Grundmoränen darf also nur bei der quartären Eiszeit der Begrenzung der einstigen Eisbedeckung gleichgesetzt werden, während wir von den älteren Eiszeiten nur die Orte des Auftretens, nicht den geographischen Umriß der Vereisungsherde kennen.

Wenn Vereisungen an das Meer stoßen, wie jetzt in Grönland und der Antarktis, oder in Süßwasserbecken eindringen, so entstehen zunächst Zwischenbildungen, in denen der Gletscherschutt geschichtet abgelagert, weiterhin über eine breite Driftzone durch Eisberge verschleppt wird. Dem rein marinen Sediment mischt sich dann in einer nach außen steigenden Verdünnung glaciales Material bei. In marinen Schichten, die fern von den Eisherden entstanden sind, werden derartige Fremdlinge sich nur selten finden, und es ist nicht wahrscheinlich, daß die leicht zerstörbaren Merkmale des Eistransports, Schleifung und Schrammung, bei ihnen erhalten bleiben. Man wird also in der Regel eines ausreichenden Grundes entbehren, um unter Ablehnung anderer Erklärungsmöglichkeiten aus ihrem Auftreten gerade auf die Existenz einer fernliegenden Vereisung zu schließen. In der Tat wären sie die einzigen, freilich schwer kenntlichen Zeugen für Eiszeiten auf versunkenen, leer gefegten oder sonst der Beobachtung entzogenen Flächen alter Kontinente. Zu negativen Schlüssen, aus dem Fehlen von Eiszeitbildungen in den bekannten Ablagerungen einer Periode, sind, wie an anderer Stelle ausgeführt,[1]) die Grundlagen niemals ausreichend.

Zweifelhafte Spuren von Eiszeiten werden genannt aus der oberen Kreide Englands, dem Oberkarbon und Unterperm Europas. Sichere Beweise liegen vor für eine quartäre, weltweit verbreitete, für eine spät-paläozoische der Südhemisphäre und Vorderindiens, für eine devonische in Südafrika und schließlich für früh-paläozoische und algonkische Eiszeiten aus sehr verschiedenen Weltgegenden.

2. Verbreitung und Alter der Eiszeiten. **2a)** Die quartäre Eiszeit. Die jüngste Vereisung wird füglich an den Anfang gestellt, weil ihre Bildungen weitaus am vollständigsten erhalten sind, und weil die Hauptherde in den geologisch am besten bekannten Weltteilen, in Europa und Nordamerika lagen.

α) Das nordeuropäische Inlandeis. Von Skandinavien, also aus einer dem mittleren und südlichen Grönland entsprechenden Breite, floß ein Inlandeis einerseits westlich zum atlantischen Ozean, andererseits über Finland, Nordwest- und Mittelrußland, Polen und Norddeutschland und drang über die Nordsee bis England vor.

Die Eisscheide lag östlich der heutigen Wasserscheide Skandinaviens und verlief in geschwungener Linie aus dem Zentrum des südlichen Norwegen nordöstlich mitten durch Schweden und Lappland. In der Maximalausdehnung erreichte das Eis den Nordural und verband sich hier mit den vom Ural und Timan herabsteigenden Gletschern. Zwischen Petschoraquelle und Weichselquelle trat es in drei breiten Zungen hervor; die östlichste überdeckte zwischen Ural und dem Oberlauf der Wolga das Quellgebiet der Wiatka und Kama, die mittlere drang zwischen Donetz und Unterlauf der Wolga bis nahe an den 50. Breitengrad, die westlichste schob sich im Dnieprgebiet etwas über den 50. Breitengrad hinaus. Von der Weichselquelle bis zur Nordsee liegt die Eisgrenze am Rand der Mittelgebirge, dann entlang dem heutigen Rheinlauf. Sie wird durch

[1]) Paläoklimatologie 2 b α.

Digitized by Google

den Harz im Norden zurückgehalten, berührt aber seitwärts davon den Thüringer Wald und die rheinischen Gebirge. Auf englischem Boden schließlich floß das skandinavische Inlandeis zwischen Yorkshire und der Themsemündung mit dem dort einheimischen, von Schottland ausgehenden Eis zusammen.

An dieses Hauptgebiet schließen sich einige Vereisungen .von größerer oder geringerer Selbständigkeit und Ausdehnung an: Nordural und Timan, Nowaja Semlja, Jan Mayen, Spitzbergen, Island und die Shetlandsinseln, ferner Irland und schließlich Schottland mit dem nördlichen und mittleren England etwa bis an den Themselauf.

Das Vorrücken und Zurückweichen des skandinavischen Eises stellt keine einfache Phase dar, sondern war von mehrfachen Schwankungen, vorübergehendem Wachstum und Abnehmen unterbrochen. Daher besteht die Grundmoräne dieser Vereisung nicht überall in einer einfachen Decke, sondern ist an vielen Orten in mehrere Decken, Zeugen wiederholten Vorschreitens, zerspalten, die oft durch mächtige Bildungen nichtglacialer Entstehung getrennt sind oder vor der Eindeckung einer starken Verwitterung ausgesetzt waren. Die Ausdehnung dieser Vorstöße und Rückzüge läßt sich noch nicht genau begrenzen, wie überhaupt diese Einzelheiten der quartären Eiszeit ein Gegenstand unerledigter und vielfach scharf umstrittener Meinungsverschiedenheiten sind.

Nur andeutungsweise kann der Stand der Frage wiedergegeben werden, wo das Eingehen auf Einzelheiten ausgeschlossen ist. Jedoch scheint die Klärung der Streitfrage nicht so sehr durch widersprechende Auffassung von Einzelheiten, als vielmehr durch die Beschaffenheit des Tatsachenmaterials überhaupt und durch die Verschiedenartigkeit der Betrachtungsweise erschwert zu werden.

Das Vereisungsgebiet ist ungleichmäßig durchforscht: die Kenntnis beruht nur zum kleineren Teil auf zusammenhängender genauer Kartierung, für weitaus die größere Fläche auf mehr kursorischer Begehung und eingehenderer Untersuchung kleinerer, abgerissener Areale. Daher ist ein Bedürfnis vorhanden nach einer Arbeitshypothese, die erlaubt, während der Aufnahme den noch zusammenhangslosen Einzelheiten eine definierte Stellung in einem stratigraphischen System anzuweisen und die Verhältnisse eines enger begrenzten, aber genau studierten Gebiets als Typus der Gesamtentwickelung schemabildend einzusetzen. Nun sind zwei Möglichkeiten gegeben: entweder vollzogen sich die Schwankungen des Eisrandes insgesamt zu gleicher Zeit, die intermoränalen Schichten und Verwitterungskrusten stellen also Leithorizonte dar, die zur zeitlichen Einstellung dienen können, oder aber die Schwankungen waren rein lokaler Natur: dem Vorrücken an einem Ort entsprach ein Zurückweichen oder Stocken an anderen. Die intermoränalen Schichten und Verwitterungskrusten wären dann keine Leithorizonte, sondern ihre zeitlichen Beziehungen müssen durch besondere Untersuchungen erst festgelegt werden.

Diese beiden in der Gegenwart vertretenen Anschauungsweisen stützen sich vielfach auf Hypothesen über das Klima der Eiszeiten und Intermoränal-(Interglacial-)Zeiten, können also insoweit erst später besprochen werden. Auf rein tatsächlichem, geologischen Boden erhellt aber ohne weiteres, daß nur die erstgenannte, in der Majorität herrschende, die Bedingungen einer Arbeitshypothese erfüllt. Mit der zweitgenannten Hypothese der Minorität gelangte man erst zu einem Gesamtbild und einer Gliederung, wenn alle lokalen Einzelheiten lückenlos feststehen und angegeben werden kann, in welcher Weise und Reihenfolge die Einzelheiten zum jetzt vorliegenden Befund zusammenwirkten.

Nach jener ersten Vorstellung wäre das Eis dreimal über Norddeutschland vorgedrungen und zurückgewichen, jedesmal in anderer Ausdehnung. Die Grenzen lassen sich im einzelnen noch nicht bestimmen, doch gilt allgemein die zweite als die Haupteiszeit, weil im Norden ihre Grundmoräne die der übrigen an Mächtigkeit zu übertreffen schien und ihr deshalb die Maximalausdehnung zuzuschreiben war. Als tatsächlicher Beweis dafür, daß zwischen zwei Zeiten des Vorrückens längere Zeit verflossen sei, wird angeführt, daß die älteren Moränen vor ihrer Eindeckung tiefgründiger verwittert seien, als die oberste, erst seit dem letzten Weichen des Eises freigelegte. Jedoch würde dieser Schluß und damit die Annahme eines auch räumlich weiten Rückgangs nur bindend sein, wenn die Mächtigkeit einer Verwitterungskruste nichts als eine Funktion der Verwitterungsdauer, und nicht auch der Stärke der Verwitterungsagentien wäre.

Eine Dreiteilung des Glacials zeigt sich auch in Skandinavien, da dort die Bewegungsrichtung des Eises dreimal wechselte nach Ausweis der Schrammen, in Schonen beispielsweise während des „älteren" und des „jüngeren baltischen Eisstromes" aus SSO, während der dazwischen liegenden „Haupteiszeit" aber aus NO kam. Jedoch fehlt es durchaus an unbezweifelten Anzeichen für Eisfreiheit in den Zwischenzeiten, besonders zwischen dem älteren baltischen Eisstrom und der Haupteiszeit, und so gewinnt die Ansicht, daß in Skandinavien die Eisbedeckung ununterbrochen bestand, immer mehr Anhänger. Dann würde, als Ganzes betrachtet, das quartäre Inlandeis Nordeuropas ein einheitliches Ereignis gewesen sein, denn, wie es sich auch mit den Schwankungen in Norddeutschland und der ganzen Randzone verhalten haben möge, sie hätten nicht auf den eigentlichen Eisherd zurückgegriffen, wären nicht Unterbrechungen der Eiszeit, sondern lokale Ereignisse größeren und kleineren Maßstabes gewesen. Ob sie in den Randzonen gleichzeitig oder örtlich zu verschiedenen Zeiten auftraten, kann nur durch direkte Beobachtung festgestellt werden: sind die intermoränalen Schichten und Verwitterungskrusten überall durchgehende Horizonte, so wird man sie als Zeugen für gleichzeitige Unterbrechungen der Eiszeit betrachten müssen. Lückenhaft, wie bis jetzt die Erkenntnis ist, läßt sie sich, wenn allein die Argumente direkter

Digitized by Google

Beobachtung in Betracht kommen, mit der einen wie mit der anderen Vorstellung vereinigen.

Im äußersten Westen finden sich, und zwar in Holland wie in Oldenburg, zwei Moränendecken, in Hannover und Westfalen nur eine, in Schleswig-Holstein jedoch drei; es ist nicht beobachtet, wie weit sie südwärts über die Elbe vorschreiten und welche von ihnen bis an die Grenze der Maximalvereisung geht. Am Harzrand sind zwei Decken bekannt, bei Berlin und in der Umgegend von Halle wiederum drei, von denen die älteste sich am weitesten, bis an den Rand des Thüringer Waldes ausdehnt; die jüngste bleibt am weitesten zurück. Die Umgegend von Leipzig war nur einmal vereist, Schlesien in einiger Entfernung von den Gebirgen dagegen zweimal. Das Gebiet einer doppelten Moränendecke umfaßt den Nordosten Deutschlands sowie Polen und Litthauen. In den russischen Ostseeprovinzen sowie im ganzen inneren Rußland ist wiederum nur eine vorhanden und erst im Norden, in Finnland und im Olonetzgebiet stellt sich eine Verdoppelung wieder her.

Sowie die Vereisung Englands von einem eigenen Eisherd in Schottland ausging, so scheinen auch die Schwankungen sich unabhängig von den kontinentalen vollzogen zu haben. Jedenfalls hat das Schema Geikies, der sechs Eiszeiten und fünf Interglacialzeiten unterschied, sich auf die kontinentalen Verhältnisse nicht anwenden lassen, übrigens auch auf dem Boden Großbritanniens verschiedene Schwierigkeiten und manchen Widerspruch gefunden.

β) Gebirgsvergletscherung in Europa. Quartäre Vergletscherungen sind auf den höheren Teilen der europäischen Gebirge vielfach nachgewiesen, in der Nähe des Inlandeises und weit davon entfernt, in Frankreich und Spanien. Größere Bedeutung gewannen die Gletscher jedoch nur in den Pyrenäen und besonders in den Alpen. In sämtlichen Fällen war der eiszeitliche Zustand nur graduell von dem heutigen verschieden, denn die quartäre Schneegrenze verlief parallel zu der gegenwärtigen, nur mehr als 1000 m tiefer.

Der Mittelpunkt der Alpenvereisung lag in der Schweiz und Tirol. Sie bildete nirgends ein Inlandeis wie in Skandinavien, sondern die im allgemeinen schildförmige Eismasse wurde durch Firngrate zerschnitten und in ein Eisstromnetz zerlegt, dessen Maschen nach Osten und Westen lockerer wurden und schließlich zerfielen. Die Scheitelhöhe lag ungefähr bei 2500 m; die Eisscheide befand sich nördlich der heutigen Wasserscheide.

Die Eisbewegung folgte im allgemeinen denselben Bahnen wie die heutigen Flüsse und trat auch in den heutigen Flußtälern auf das Vorland hinaus, in breiten Gletscherzungen, die dann teils selbständig blieben, teils zu einer Vorlandvergletscherung zusammenflossen. So läßt sich ein Rhonegletscher unterscheiden, der bis in das Saonetal vordrang; daran anschließend ein Linth- und Reuß-Gletscher und drittens ein Rheingletscher. In der Zeit der Maximalausdehnung war also die Schweiz unter einer über 1000 m mächtigen Eisdecke begraben, die zusammenhängend von Lyon bis unweit Ulm reichte, den Schweizer Jura überstieg, aber am Schwarzwald und am Schwäbischen Jura eine Grenze fand. Von beträchtlicher Ausdehnung war auch noch das aus Iller-, Lech- und Isar-Gletscher zusammengeschobene Vorlandeis, das zeitweilig bis an den Schwäbischen Jura und bis unweit Augsburg vordrang. Die ostwärts folgenden Gletscher im Gebiet des Inn, der Salzach, der Traun und Krems blieben immer mehr auf das unmittelbar anstoßende Vorland und schließlich auf das Gebirge selbst beschränkt. Im Westen und Süden der Alpen ward der Gebirgsrand nur im Gebiet der oberitalischen Seen überschritten, doch blieb das Ausmaß der Gletscher weit hinter dem der nordalpinen zurück. Im Osten wuchs nur der Drau- und Save-Gletscher zu beträchtlicher Größe, ohne aber das Vorland zu erreichen.

In den Pyrenäen blieben die Gletscher getrennt und traten nicht in das Vorland. Auf der Nordseite war die Vereisung stärker als auf der Südseite, im Westen stärker als im Osten.

Penck und Brückner haben die Schwankungen des Eisrandes in den Alpen auf das eingehendste studiert und beschrieben. Sie unterschieden zunächst im nördlichen Vorland vier, durch längere eisfreie Interglacialzeiten getrennte Vereisungen, die als Günz-, Mindel-, Riß-, und Würm-Eiszeit bezeichnet werden. Die älteste, die Günzeiszeit, hatte im großen und ganzen dieselbe Ausdehnung wie die jüngste, in der Bodenform des Alpenvorlandes bestimmend auftretende Würmeiszeit, die Moränen der Mindel- und Rißeiszeit, stark abgetragen und verwischt, drangen weit darüber hinaus. Nur im Südosten überschritt die Würmeiszeit die Rißmoränen. Neben diesen großen Schwankungen traten auch solche kleineren Ausmaßes auf, die aber — wohl wegen der Erhaltungsbedingungen — nur aus den Rückgangszeiten der Würmeiszeit bekannt sind.

Moränen der Günzeiszeit sind so gut wie gar nicht erhalten; sie verrät sich hauptsächlich in fluvioglacialen Schotterbildungen, die sich an die Moränen anschließen. Bei erneutem Vordringen des Eises wurden diese von den Schmelzwassern teilweise abgetragen und zerschnitten. Auf diese Weise entstanden Terrassen, die sich im bayrischen Vorland in Vierzahl, als älterer und jüngerer Deckenschotter, Hoch- und Niederterrasse bezeichnet, finden und in derselben Reihenfolge der Günz-, Mindel-, Riß- und Würmeiszeit entsprechen.

Im Innern der Alpen waren nach den wenigen vorliegenden Beobachtungen die Unterschiede zwischen den Gletschermächtigkeiten unbeträchtlich. Intermoränale Ab-

Digitized by Google

lagerungen, der Zeit zwischen Riß- und Würmeiszeit zugewiesen, finden sich im Vorland und nur ganz vereinzelt in den Randzonen des Gebirges, z. B. die Höttinger Breccie bei Innsbruck.

Der Fülle von Beobachtungen gegenüber, die Penck und Brückner zusammengebracht haben, ist es für Umdeutungen des Befundes schwer, sich Gehör zu schaffen. Der meist als unbedingt triftig geltende Schluß, daß die Alpen in den Interglacialzeiten eisfrei oder nicht stärker als jetzt vergletschert waren, ruht fast ganz auf klimatischen Vorstellungen, die hier zunächst außer Betracht bleiben. Die intermoränalen Bildungen innerhalb des Gebirges werden von anderer Seite als teils präglacial, teils postglacial bezeichnet. Im Gebirge sind Moränen der älteren Eiszeiten nicht vorhanden; sie wurden also entweder abgetragen durch späteres Vorrücken der Gletscher, oder es war bei einheitlicher Vereisung dort nur eine einheitliche Moräne vorhanden. So ist bis jetzt auf dem Boden der geologischen Tatsachen auch die andere Vorstellung möglich, daß im Innern der Alpen das Eisstromnetz die ganze Zeit hindurch unverändert bestand, und daß die Schwankungen nur in der Vorlandvereisung und vielleicht nicht einmal in allen Gletscherzungen gleichzeitig auftraten. Der sichtbarste Vorzug der Vier-Eiszeitentheorie ist ihre Verwendbarkeit als Arbeitshypothese.

In den meisten übrigen Gebirgen ist bei gewöhnlich wenig umfangreichen Vereisungen nichts über Schwankungen beobachtet. Jedoch findet sich z. B. im Schwarzwald eine dreifache Moränenbildung, im oberen Moseltal deuten vierfache Terrassen auf viermalige, in den Pyrenäen dreifache Schotter auf dreimalige Vergletscherung.

γ) Das nordamerikanische Inlandeis. Während an der europäisch-atlantischen Küste das Inlandeis nördlich vom 50. Breitengrad blieb, erreichte es in den atlantischen Staaten Nordamerikas den 40., in den pazifischen den 47. Breitengrad. Diesem folgt im Westen des Festlandes die Südgrenze der Maximalvereisung; sie geht dann annähernd dem Lauf des Missouri entlang bis in die Nähe von St. Louis und schwingt dann zurück, um in der Gegend von New York die Küste zu treffen. Das Eis drang also vor bis in die Breite Siziliens und bedeckte eine ungefähr dreimal so große Fläche als in Europa. Es ging aus von drei Vereisungsherden, die in Labrador, in Keewatin zwischen Hudsonsbay und großem Sklavensee und in der Küstencordillere von Britisch-Columbia ihren Sitz hatten. Mehrere Zentren geringeren Umfangs schlossen sich an, auch Gebirgsvergletscherungen in den Rocky mountains, der Sierra Nevada u. a. Auch das grönländische Inlandeis, dessen quartäre Ausdehnung die gegenwärtige übertraf, kann als ein amerikanisches Vereisungszentrum betrachtet werden, obwohl es wahrscheinlich niemals mit den benachbarten in direkten Zusammenhang getreten ist.

Wie in Europa, so beweisen auch in Amerika Verwitterungskrusten und intermoränale Bildungen nichtglacialer Entstehung, daß die Ausdehnung des Eises mehrfach schwankte. Auch scheinen die drei Zentren nicht gleichzeitig ihre größte Bedeutung erlangt zu haben; insbesondere ging das Keewatineis dem Labradoreis voran und überdeckte Gebiete zuerst, in denen dann später das Labradoreis einzog. Die Gliederungsversuche können bei der Ausdehnung und unvollständigen Durchforschung des Gebiets nur provisorische Geltung beanspruchen.

Es stehen sich in Amerika dieselben Grundanschauungen gegenüber wie in Europa. Nach der einen schwand die Eisbedeckung während der Eiszeit niemals gänzlich, sondern veränderte nur ihre Verbreitung; nach der anderen schoben sich zwischen die Eiszeiten Interglacialzeiten mit völliger Eisfreiheit ein, doch widersprechen sich die Angaben über deren Anzahl. Es werden zwei bis fünf Eiszeiten angegeben und mit besonderen, zuweilen in verschiedenem Sinn angewandten Namen belegt.

δ) Die übrigen Erdteile. Schon die Cordillerenvereisung Nordamerikas ist mehr eine Gebirgsvergletscherung als ein Inlandeis. Diese letztere Vereisungsform tritt außer an den beiden Seiten des Atlantik nur noch in der Antarktis auf, wo die quartäre Vereisung stärker gewesen zu sein scheint als die gegenwärtige. Auch waren damals die Kerguelen und Südgeorgien eisbedeckt, dagegen die Falklandsinseln anscheinend nicht.

In den meisten Gebirgen der Erde lag die quartäre Schneegrenze tiefer als jetzt. So finden sich Gletscherspuren in Mittelasien von den Küstenketten am Ochotskischen Meer bis zum Südabhang des Himalaja, am Kaukasus usw., auch in den Tropen, wie in den peruanischen Anden, am Kilimandscharo und in Westneuguinea am Wilhelmina Peak, hier überall jedoch erst in Meereshöhen von mehr als 4000 m.

Sehr auffällig ist, daß am Franziskahafen in Deutsch-Neuguinea, auf 7° Südbreite und inmitten einer Küste, die an norwegische Fjordlandschaften gemahnen soll, angeblich quartäre Moränen im Meeresniveau gefunden sind. Es wird angenommen, daß sie in derselben Meereshöhe entstanden sind, wie die sonstigen quartären Gletscherbildungen der Tropen und auf starke lokale Senkungen an dieser vulkanisch sehr bewegten, aber sonst überall aufsteigenden Küste deuten. Bestätigung bleibt abzuwarten.

Gegen die südliche gemäßigte Zone sank die Schneegrenze wieder herab. Daher nahm die Vereisung der chilenisch-patagonischen Anden südwärts zu, doch erst vom 40. Grad Südbreite ab traten die Gletscher aus dem

Digitized by Google

Gebirge heraus und bildeten auf der Ostseite langgestreckte Vorlandsvereisungen.

Auffällig ist demgegenüber die Angabe, daß auf den Falklandinseln keine quartäre Vergletscherung nachweisbar sei.

Auch in Südaustralien, Neuseeland und Tasmanien trat die Eiszeit als Gebirgsvergletscherung von teilweise bedeutenden Dimensionen auf.

Die Kenntnisse über die Ausdehnung dieser Gletscher sind vielfach noch ungenau. Schwankungen oder mehrfache Vereisungen werden nur aus Südamerika berichtet, wo zweifache oder dreifache Moränenbildung stattgefunden hat.

Das ältere Quartär wird demnach überall auf der Erde durch tiefere Lage der Schneegrenze charakterisiert und war auch in solchen Ländern, in denen es nicht zur Gletscherbildung kam, meist eine Zeit erhöhter Niederschläge, eine Pluvialzeit, die wie die Eiszeit allmählich und vielfach mit Schwankungen und vorübergehenden Stillständen in die Verhältnisse der Gegenwart übergeführt wurde.

ε) Die zeitlichen Beziehungen zwischen den quartären Vereisungen. Wenn auch das ungefähre Alter der besprochenen Glacialbildungen nicht zweifelhaft ist, da sie sämtlich einer der Gegenwart unmittelbar vorangehenden Zeitstufe, also dem Quartär angehören, so ist doch die Gleichzeitigkeit der Eiszeiten an den verschiedenen Orten, noch mehr der angenommenen Einzelphasen und Interglaciale, zunächst nur eine Arbeitshypothese der Stratigraphie, deren Zulänglichkeit für paläogeographisch-klimatologische Zwecke der Nachprüfung bedarf. Aber auch sonst legt die ungleichzeitig eingetretene Maximalausdehnung der nordamerikanischen Eiszentren den Gedanken nahe, zu verallgemeinern und die Ungleichzeitigkeit der in verschiedenen Weltgegenden liegenden Eiszeiten als möglich zu betrachten. Hiernach aber erheben sich Bedenken, ob beispielsweise das von Penck und Brückner für die Alpen abgeleitete Schema ohne weiteres auf andere Gebiete, auch bei rein stratigraphischer Betrachtung, übertragen werden dürfe, besonders wenn unabhängige Untersuchung zu einer anderen Einteilungsweise geführt hatte. In der Regel wird die Entscheidung hierüber durch Hypothesen und Opportunität bestimmt bleiben, denn nur in einem einzigen Fall lassen sich die zeitlichen Beziehungen zwischen den Schwankungen getrennter Eisherde mittels geologischer Beobachtung der Lagerungsverhältnisse aufsuchen, nämlich zwischen den Alpen und dem nordeuropäischen Inlandeis, da die von den alpinen Vereisungen abhängigen Terrassen des Rheins und die Grundmoränen Hollands in Verbindung treten. Doch ist eine derartige Untersuchung noch nicht durchgeführt.

Es steht nicht fest, welche der drei in Norddeutschland bekannten Moränendecken sich bis Holland fortsetzt, nachdem neuere Beobachtungen über die Moränenmächtigkeit zeigten, daß die mittlere, die der „Haupteiszeit", nicht so weitaus die stärkste ist, als man früher annahm. Zweitens ist unbekannt, ob die zwei Moränendecken Hollands einer einzigen von den nördlichen zugehören und nur untergeteilt sind, wie man es bisher für die oldenburgischen annahm, oder ob jede die Fortsetzung einer der nördlichen ist. Drittens ist vielfach bestritten worden, daß die Niederterrasse des Rheinunterlaufs, die dem Glacial Hollands entspricht, die Fortsetzung der oberrheinischen Hochterrasse und der Schweizer Rißmoränen sei, wie man das behauptet hatte als Beweis für die Gleichzeitigkeit der nördlichen Haupteiszeit und der alpinen Rißeiszeit. Daher ist es vorläufig nur eine Vermutung, daß die Günzgletscher Skandinaviens nicht nach Norddeutschland gelangt seien, und daß weiterhin die Mindeleiszeit der ersten, die Rißeiszeit der zweiten, die Würmeiszeit der dritten Eiszeit des Nordens sowohl zeitlich als den Größenverhältnissen nach entspräche, eine Vermutung, die, solange im Norden noch nirgends 4 Moränen übereinander nachgewiesen sind, zudem für die Günzeiszeit völlig in der Luft schwebt, und der, in welcher Begründung sie auch auftritt, auf Grund anderer Verschiedenheiten im Auftreten der nordischen Vereisung widersprochen wird.

2b) Die spät-paläozoische Eiszeit. α) Verbreitung. Die spät-paläozoische Eiszeit hatte ihre Herde auf dem Boden des alten Gondwanakontinents, in Australien, Vorderindien, Südafrika und Südamerika, weist also in der Verbreitung nicht die geringste Aehnlichkeit mit der der quartären auf.

Das australische Eis ging aus von einem südlich des heutigen Kontinents gelegenen Festland und erstreckte sich über Tasmania, Viktoria und die anstoßenden Teile von Neusüdwales. An das Inlandeis schloß sich nördlich eine breite Driftzone, deren Spuren sich an der Ostküste des Erdteils bis über den Wendekreis hinaus in Kohlenbildungen eingeschleppt finden, ferner, von anderen Strecken des Eisrandes ausgehend, an verschiedenen Orten Mittel- und Westaustraliens.

Auch in Vorderindien lag der Ausgangspunkt im Süden; die Grundmoräne, das Talchirkonglomerat, beginnt südlich vom 20. Grad nördlicher Breite in der Umgegend von Chanda und läßt sich über breite Unterbrechungen hinweg bis einerseits nach Bengalen, andererseits in das Pendjab und in die Saltrange verfolgen. Hier, jenseits des 32. Grades nördlicher Breite, erreichten die Eismassen das Meer. Eine Driftzone ist unbekannt.

Der Ausgangspunkt des südafrikanischen

Digitized by Google

Eises wurde bisher in Rhodesia gesucht. Jedenfalls kam die Bewegung in Transvaal, Natal und dem Kapland aus Norden. Die Grundmoräne, das Dwykakonglomerat, ist ungefähr vom 25. Grad südlicher Breite bis zum Kap ziemlich zusammenhängend bekannt, ändert aber in der Gegend des 33. Breitengrades ihre Beschaffenheit insofern, als von hier ab südwärts der Absatz unter Mitwirkung des Wassers, des Meeres oder großer Landseen erfolgt sein muß. Westlich wurde nach gefundenen Fossilien das Meer erreicht, in der Gegend von Keetmannshoop.

Noch ungeklärt ist, ob die neuerdings bei Katanga auf 10 Grad südlicher Breite gefundenen Glacialkonglomerate zum Dwyka gehören und ob nun der Ausgang der südafrikanischen Vereisung nördlich oder südlich von Katanga zu suchen ist. Die Altersbestimmung stützt sich in Ermangelung anderer Anhaltspunkte nur darauf, daß das Dwykakonglomerat das verbreitetste und bekannteste Glacial in Südafrika ist. Da jedoch aus dem Kapland außerdem noch eine devonische und eine kambrisch-präkambrische Eiszeit genannt wird, und da ferner nach den bisherigen Anschauungen in Katanga Konglomerate verschiedenen Alters vorkommen, ist diese Art der Parallelisierung nicht beweiskräftig. Das gleiche gilt dann für das noch weiter entfernte Glacial von Togo.

Die spät-paläozoische Vereisung Brasiliens ist erst in jüngerer Zeit in den Staaten Minas Geraes und Paraná erkannt, sowie Drift in S. Paulo, Sta. Catharina, Rio grande do Sul. Genauere Angaben stehen noch aus, auch darüber, ob es sich um marine oder lagunäre Drift handle. Die Nähe der Küste ist nach Beobachtungen anderer Art wahrscheinlich.

Weit außerhalb der sonst von diesen Vereisungen eingehaltenen Zone, auf dem 50. Grad südlicher Breite sind auf den Falklandsinseln Ueberreste eines zugehörigen, in Anbetracht der Entfernung wohl als selbständig zu betrachtenden Eisherdes gefunden. Ueber Bewegungsrichtung und über Lage zum Meer ist nichts bekannt.

Schwankungen und intermoränale Ablagerungen sind bei den Moränen dieser Eiszeit nirgends beobachtet.

β) Alter. Die Altersbestimmung der spät-paläozoischen Eiszeit bietet Schwierigkeiten und schwankt, nachdem sie ursprünglich auf eine Zwischenstufe „Permokarbon" gelautet hatte, zwischen Oberkarbon und unterem Perm. Auf dem Boden stratigraphischer Betrachtungsweise stellt man nach der schon beim Quartär besprochenen Arbeitshypothese die verschiedenen Vereisungen trotz ihrer räumlich so weiten Trennung auf dieselbe Zeitstufe ein und bleibt dann im Einklang mit der grundlegenden Arbeitshypothese der Stratigraphie, der zeitlichen Gleichsetzung identischer Fossilien, da in Australien, in der Saltrange und Deutsch-Südwestafrika eine charakteristische, durch Conularia und Eurydesma bezeichnete Fauna im Zusammenhang mit den Glacialbildungen auftritt, und unmittelbar darüber die ältesten Typen der Glossopterisflora. Dann aber gibt es verschiedene Wege, diese glaciale Zeitstufe in das stratigraphische System einzuordnen.

Bei strengem Festhalten an den Arbeitshypothesen der Stratigraphie ergibt sich, daß die spätpaläozoische Eiszeit dem Oberkarbon, vielleicht sogar dem Mittelkarbon zuzurechnen sei, wie das durch Tschernyschew und neuerdings durch Haug geschah. Die ostaustralische Drift findet sich in Schichten, deren Fauna eine gewisse, wenn auch nicht sehr starke Verwandtschaft mit der des unteren Produktuskalks in der Saltrange aufweist. Dieser ist einerseits von dem glacialen Konglomerat durch eine Gruppe von Zwischenschichten getrennt und hat andererseits der Fauna nach enge Beziehungen zum uralischen Oberkarbon. Die zeitliche Gleichstellung beider Faunen wird noch dadurch begünstigt, daß die Fauna des mittleren Produktuskalks der des russischen und mediterranen Perm entspricht. Zu gleichem Ergebnis führt die stratigraphische Auswertung der Pflanzen: in Afrika und in Brasilien überdecken sich die Verbreitungsgebiete der nördlichen (Lepidodendron-) und der südlichen (Glossopteris-) Flora. Hiernach würden die Ekkaschichten, die in Südafrika, und die Karharbarischichten, die in Indien in einigem Abstand den Glacialbildungen folgen, nebst den brasilianischen Aequivalenten zum unteren Perm, die Glacialschichten also zum Oberkarbon gehören.

Jedoch geht der Produktuskalk nach oben ohne irgendwelche Unterbrechung des Zusammenhangs in unzweifelhafte Triasbildungen über, und es scheint nicht angängig, eine in sich so einheitliche Schichtenfolge, deren Fauna deutlich auf geschlossene Entwickelung verweist, über die lange Zeitspanne vom Beginn des Oberkarbon bis zum Beginn der Trias zu strecken, noch dazu auf Grund nicht gerade erdrückender Uebereinstimmungen der Faunen und unter Nichtbeachtung mancher faunistischen Unterschiede. Ferner tritt die älteste Glossopterisflora, bezeichnet durch die Gattungen Glossopteris und Gangamopteris und der australischen Eisdrift und den Talchirschichten Indiens angehörig, wenig oder gar nicht verändert an der Dwina unmittelbar über Schichten mit einer Zechsteinfauna auf, hier sogar vergesellschaftet mit Pareiosaurus und Dicynodon, Reptilien der unteren Beaufortschichten, die in Afrika den Ekkaschichten folgen. Die Glossopterisflora wanderte also während oder nach der Eiszeit in Vorderindien ein und breitete sich später, und zwar nach neueren Funden wahrscheinlich über ein sibirisches Festland nordwärts aus. Da ist es aber kaum glaublich, daß eine Kryptogamenflora bei ihrer raschen Wanderfähigkeit die Zeit vom Beginn des Oberkarbon bis in die Mitte des Perm habe aufwenden

Digitized by Google

müssen. Wenn nun bei der Altersbestimmung die Zeitdauer von Wanderungen überhaupt berücksichtigt werden soll, so muß das auch bei Meeresfaunen geschehen. Nun ist die Fauna des Produktuskalk offenbar erst nach dem Ende der Eiszeit in dieses Küstengebiet eingezogen und hat dort die ältere, durch Conularia bezeichnete verdrängt oder ersetzt. Ein Teil der eingewanderten Arten tritt auch im Oberkarbon des Ural auf, ist dort aber als einheimisches Element zu betrachten, da eng verwandte Formen schon vorher in den russischen Meeren lebten. Die Wanderung dieser Brachiopoden muß bei der geringen Wanderungsfähigkeit des Typus sehr viel längere Zeit beansprucht haben, als die umgekehrt gerichtete der Glossopterisflora. Durch Betonung teils dieser Lagerungsverhältnisse, teils der theoretischen Argumente gelangten Noetling und Koken dazu, die Talchirschichten in das mittlere Rotliegende, folglich das Talchirkonglomerat und die Eiszeit etwa an die Grenze des unteren und mittleren Rotliegenden zu setzen.

Die Abweichung zwischen diesen beiden Schlußreihen beruht darauf, daß die erste rein stratigraphisch verfährt, die zweite aber mit der Möglichkeit rechnet, daß Faunen und Floren wanderten ohne ihre Beschaffenheit wesentlich zu ändern, also in Annäherung an paläogeographische Betrachtungsweise die Arbeitshypothese der Leitfossilien nicht mehr als unbedingt gültig anerkennt. Der Versuch, sie durch Abwägen der Gründe zu einem Gesamtresultat zu vereinigen, ist aussichtslos, weil sich die jeweiligen Methoden und Ziele ausschließen. Jedoch ist gegen die zweitbesprochene Altersbestimmung verschiedenes einzuwenden.

Zwischen dem Ural und der Saltrange liegt ein breites, so gut wie unerforschtes Gebiet, und es ist daher unbekannt, wieweit die uralische Faunenprovinz sich schon im Karbon und während der Eiszeit gegen Indien ausgedehnt hat. Die Dauer einer Wanderung, deren Weglänge man nicht kennt, läßt sich nicht abschätzen. Ferner ist es nicht wohl angängig, sich nur von der einen Arbeitshypothese der Stratigraphie freizumachen, die andere aber, die bei paläogeographischer Betrachtung gleichfalls unzulänglich ist, die zeitliche Gleichsetzung der Vereisungen beizubehalten. Es ist dann zu berücksichtigen, daß die spätpaläozoische Eiszeit aus einer Reihe selbständiger Vergletscherungen in weit entfernten Gebieten bestanden haben kann, die sich im Alter auf die Zeit vom Oberkarbon bis ins untere Perm verteilten. Die Conularienfauna erschiene dann als Bewohnerin abgekühlter Meeresküsten, verlöre den Leitfossilcharakter und ähnlich wäre das Auftreten identischer Floren über den Glacialbildungen pflanzengeographisch, nicht in erster Linie zeitlich, zu begreifen.

Zu einer methodologisch einwandfreien, rein paläogeographischen, Behandlungsweise ist das Oberkarbon und Perm noch nicht geeignet. Wie wenig Vertrauen die bisherigen Darstellungen verdienen, erhellt aus dem Auftreten der gleichen Reptiliengattungen in Südafrika und an der Dwina. Danach müßte im Perm eine Landverbindung quer über die Tethys bestanden haben; nichts berechtigt zu dem Schluß, daß sie nur schmal und eine rasch vorübergehende Bildung gewesen sei. Nimmt man aber längere Dauer für sie an, so tritt man in Widerspruch zu sämtlichen bisher vorliegenden Rekonstruktionen.

Der augenblickliche Stand der Altersfrage lautet also, daß bei rein stratigraphischer Betrachtung die spät-paläozoische Eiszeit dem Oberkarbon angehört, daß sich aber für paläogeographische Zwecke nur eine in weiten Grenzen schwankende Altersbestimmung ergibt. Da letzten Endes alle Untersuchungen über Eiszeiten in paläogeographischer oder paläoklimatischer Richtung ausmünden, so erhellt, daß diesen weiteren Betrachtungen bei der spätpalaeozoischen Eiszeit die von grundsätzlichen Bedenken freie Unterlage fehlt.

2c) Verbreitung und Alter der früh-paläozoischen und algonkischen Eiszeiten. Südafrika hat mehrfach Spuren älterer Vereisungen geliefert und zwar Drifteinschwemmungen in Schieferlagen des unterdevonischen Tafelbergsandsteins und ebensolche in dessen Liegendem. Die letzteren bedürfen noch der Bestätigung und ihr Alter läßt sich vorläufig auch nur als vordevonisch bezeichnen. Wie erwähnt, gehören möglicherweise die Glacialbildungen von Togo und Katanga einer dieser Eiszeiten, oder auch einer selbständigen anderen an.

Auch Südaustralien, die Gegend von Adelaide, war Schauplatz einer alt-paläozoischen Vereisung, deren Herd wiederum jenseits der heutigen Küste zu suchen ist. Es ist noch zweifelhaft, ob hier eine Moräne oder Drift vorliegt; ebensowenig ist das Alter fest bestimmt, da die Glacialschichten diskordant auf archäischen und konkordant unter kambrischen Schichten liegen.

Derselbe zeitliche Spielraum zwischen Kambrium und Algonkian ist gelassen beim Glacial von Simla am Südabhang des Himalaja und von Wutschang am Yangtse; ein noch weiterer, zwischen Algonkian und Perm, bei den Glacialbildungen am Varangerfjord, dem unter allen hier zu nennenden am längsten und genauesten bekannten Vorkommen. Hieran reihen sich einige Eiszeiten früh-paläozoischen oder präkambrischen Alters, die noch mit Unsicherheiten verschiedener Art behaftet sind, Moränenbildungen im Coppermine-Distrikt des arktischen Amerika, in Labrador, Spitzbergen, an der Lenamündung und weiter südlich, in Westschottland.

In beträchtlicher Ausdehnung ist eine algonkische, huronische Eiszeit bekannt geworden aus der Umgegend des Lake superior und der kanadischen Provinz Ontario. Es liegt nahe, alle genannten Eiszeiten schwankender Altersbestimmung mit dieser zeitlich festliegenden zu parallelisieren und ihr eine weltweite, die Bedeutung der quartären noch

Digitized by Google

in Schatten stellende Verbreitung zuzuschreiben. Indessen würde dadurch dem geologischen Befund in ähnlicher Weise Gewalt angetan, wie es bei Annahme oberkarbonischen Alters für die spät-paläozoische Eiszeit der Fall ist, denn die Ablagerungen, die sich in Australien und im Yangtsetal bei fast völliger Konkordanz zwischen das Glacial und den ersten fossilführenden, kambrischen Horizont schieben, scheinen nicht mächtig genug zur Deckung einer so gewaltigen Zeitspanne. Demnach ist es richtiger, in den meisten dieser Fälle auf genaue Altersbestimmung zu verzichten und mit zwei zeitlich weit getrennten Eiszeiten von noch unbekannter Ausdehnung zu rechnen, die dann dem Kambrium und dem Algonkian, speziell dem Huronian, angehören.

Einer näheren Betrachtung nach paläogeographischen und paläoklimatischen Gesichtspunkten sind diese Bildungen einer so sehr lückenhaft bekannten Vorzeit ohnehin unzugänglich.

3. Geologische Wirkungen der Eiszeiten. 3a) Aufschüttungen. *α*) Erratische Geschiebe. Die erratischen Geschiebe, Blöcke landfremden Gesteins, die im Gebiet aller Quartärvereisungen sehr häufig und in beträchtlicher Größe auftreten, gaben zuerst Anlaß zur Aufstellung der Eiszeittheorie, nachdem man sich überzeugt hatte, daß der Transport so großer Massen am einfachsten durch Eiswirkung, Gletscher oder Eisberge, erklärt werden könne. Die größten solcher Blöcke haben von jeher die Aufmerksamkeit erregt, traten in Beziehung zur Sage und erhielten, wie die Markgrafensteine bei Fürstenwalde, besondere Namen.

β) Grundmoränen usw. Die Herkunft und damit die Richtung des Eistransports ließ sich ermitteln, als man die eingeschleppten Gesteine anstehend in Skandinavien, den Alpen usw. fand. Jedoch erwiesen sich für die Kenntnis der Eiszeiten die Grundmoränen weit wichtiger, deren Erkennung im nordeuropäischen Diluvium den älteren Eisberg- und Drifttheorien den Garaus machte. Als Gesamtbezeichnung hat sich freilich im Deutschen das Wort „Diluvium", im Englischen das Wort „Drift" erhalten, doch ist der alte Sinn dieser Worte verloren gegangen. Die Grundmoränen bestehen aus ungeschichteten Mergeln mit unregelmäßig eingestreuten Geschieben, dem Produkt der glacialen Erosion. Sie enthalten außer dem vom Ausgangsgebiet eingeschleppten Schutt noch eine größere oder geringere Menge von unterwegs aufgenommenem. Die Quartärmoränen Norddeutschlands führen daher Trümmer tertiärer und cretacischer Gesteine, die den skandinavischen fehlen und haben außerdem aus den überschrittenen Tertiärbildungen ihren Sandgehalt angereichert. Moränen, die vorwiegend aus Trümmern des direkt unterlagernden Gesteins bestehen, nennt man Lokalmoränen.

Bisweilen wird der Eindruck der Schichtung hervorgerufen durch das Auftreten von dünnbankiger Absonderung, die unter dem Druck der überlagernden Eismassen entstanden ist, ferner dadurch, daß sich größere Geschiebe in ungefähr parallelen Lagen wie Steinpflaster anordnen, wahrscheinlich infolge rein lokaler, mit der Mechanik der Moränenbewegung zusammenhängender Ursachen.

Die Gesteinsfarbe der Grundmoränen, des frischen Geschiebemergels ist blaugrau. Durch Verwitterung geht sie über in grau oder gelb. Nicht selten ist auch rote Verfärbung beobachtet, die dem Mergel eine gewisse Aehnlichkeit mit Laterit, dem typisch tropischen Verwitterungsprodukt verleiht, doch läßt sich noch nicht entscheiden, ob es sich nur um eine Aehnlichkeit der Farbe oder um weitergehende Uebereinstimmung handelt. Der durch Verwitterung entstandene Geschiebelehm unterliegt einer weiteren Veränderung dadurch, daß die tonigen Bestandteile herausgespült werden. Durch solche relative Anreicherung der sandigen Bestandteile entstehen zunächst Zwischenstufen zwischen Sand und Lehm; das Endprodukt ist reiner Geschiebesand, der dann zuletzt durch Auswaschung alles feinzerriebenen Detritus sich in eine Steinsohle, einen nur aus den gröberen Geschieben bestehenden Moränenrest umwandelt.

Das Gestein der paläozoischen Grundmoränen ist ein Geschiebemergel (englisch Till) mit allen Merkmalen des quartären, nur meist verfestigter und erhärtet. Er wird als Tillit bezeichnet.

γ) Endmoränen usw. Die Endmoränen sind nur aus dem Quartär bekannt und auch hier nur von dem letzten Eisvorstoß, der die Gegend betroffen hat, da die der früheren Etappen durch die letzte abgetragen und in die neue Grundmoräne aufgenommen sind. Ihrer Entstehung nach gehören die eiszeitlichen Endmoränen zum Komplex der Grundmoränenbildungen, da sie nicht wie die Stirnmoränen der heutigen Gletscher vorwiegend durch Anhäufung des Oberflächenmoränenschuttes, sondern durch Aufstauung der Grundmoränen entstanden sind. Daher bilden die Moränen der quartären Gletscher eine einheitliche Serie zusammenhängender und zusammengehöriger Erscheinungen, die von Penck aus dem Vorland der Alpen eingehend beschrieben und als Zungenbecken bezeichnet sind. Um ein wannenförmiges vertieftes Feld, das nur von einer dünnen Grundmoränenschicht bedeckt ist und dessen Mitte durch einen See oder ein Moor eingenommen zu werden pflegt, schließt sich ansteigender Boden, indem die Grund-

Digitized by Google

moräne sich verdickt, und zuletzt ein bogenförmiger Gürtel von Endmoränen, die in der Landschaft als wallartige Erhebungen, meist in mehreren gleichlaufenden Zügen angeordnet, hervortreten.

In der Umgebung eines Inlandeises sind die Zungenbecken selten deutlich individualisiert; sie treten zu langen Zügen zusammen und verfließen ineinander. Dabei geht die Beckenform verloren; die Endmoränen ordnen sich zu langen Hügelzügen, die sich in Norddeutschland an verschiedenen Stellen, so z. B. zwischen Oder und Warthe und in der Küstengegend der Ostsee von Schleswig-Holstein bis Ostpreußen erhalten haben. Die Endmoränengebiete sind hier wie im Vorland der Alpen landschaftlich charakterisiert durch ihr bewegtes Bodenrelief und ihren Reichtum an Seen: die Seenlandschaften Bayerns, das Balticum usw. gehören zum größten Teil hierher.

Eingehende Schilderungen der Grundmoränen- und Endmoränenlandschaften in Norddeutschland enthält Wahnschaffes bekanntes Werk über die Oberflächengestaltung des norddeutschen Flachlandes.

Die Endmoränen bezeichnen im Gebiet der Inlandvereisungen nicht die äußerste Grenze, bis zu der ein Eisvorstoß gelangt ist, vielmehr geht die zugehörige Grundmoräne oft weit über die Endmoräne hinaus; sie bezeichnen nur die Orte, an denen das zurückweichende Eis längere Zeit hindurch stationär blieb.

Die verschiedenen Moränenzüge erlauben daher, annähernd die Geschwindigkeit des Zurückweichens an verschiedenen Orten abzuschätzen. So zeigt sich, daß ihre Linien sich auf skandinavischem Boden gegen Christiania zusammendrängen und fächerartig über das südliche Schweden ausstrahlen, wonach zwischen zwei Stillständen der Rückgang in Schweden weit schneller erfolgt wäre, als näher am Gebirge, dem eigentlichen Eisherd. Bemerkenswerter als diese Tatsache, die man auch ohne Beweis voraussetzen würde, sind die Beobachtungen De Geers über die kleinen Endmoränen in der Gegend von Stockholm. Sie wiederholen sich in regelmäßigen Abständen und gleich an Größe und Beschaffenheit, so daß sie Stillständen in kurzfristigen Perioden, vermutlich von Winter zu Winter darstellen müssen. Hiernach hätte der jährliche Rückgang 200 bis 300 m betragen.

Zu den Grundmoränengebilden gehören die Drumlin, schwarmförmig angeordnete Hügel von elliptischem Grundriß und in der Richtung des Eisschubs angeordnet.

Sie bestehen aus dem Material der Grundmoränen, häufig mit einem Kern anderer, fluvioglacialer Entstehung, und finden sich bei Inland- und Vorlandvergletscherungen da, wo gegen die Endmoräne zu die Grundmoränendecke mächtiger wird, sind also sicher unter Eisbedeckung entstanden. Da man sie von heutigen Gletschern nicht kennt, hat man über ihre Entstehungsweise nur Vermutungen, nach denen sie entweder eingehüllte Erosionsreste oder aufgepreßte Teile der Grundmoräne unter Längsspalten in der Eisdecke darstellen.

Nicht unbestritten ist die glaciale Entstehung der Steinströme, die ein Analogon der heutigen Oberflächenmoränen sein sollen und neuerdings mehrfach als Beweise für die quartäre Vergletscherung von Mittelgebirgen angeführt werden. Man nimmt an, es seien hier von den Talrändern so gewaltige Massen von Schutt auf kleine Gletscher gestürzt, daß sie von diesen nicht mehr hätten transportiert und zu Endmoränen aufgebaut werden können. Nach anderen Autoren ist jedoch diese Art von Blockanhäufung nicht glacialer Entstehung, sondern eine Folge der Verwitterung in kaltem, aber gletscherfreiem Klima. Die Angabe, daß die Falklandsinseln im Quartär nicht vereist gewesen seien, stützt sich darauf, daß die dort vorhandenen Steinströme auf die letztere, Solifluktion genannte Art entstanden seien, die, wenn auch abgeschwächt, noch jetzt dort fortwirkt.

δ) Schotterfelder usw. An die alpinen Zungenbecken und die Endmoränenzüge der Inlandvereisungen schließen sich mehr oder weniger breite Schotterfelder, Sedimente der Gletscherbäche und -flüsse. Jede Schwankung des Eisrandes verschob die Grenze zwischen Glacial und Fluvioglacial; daher finden sich vielfach Moränen und Sedimente ineinander verzahnt und ineinander übergehend. Unter Hvitàbildungen versteht man Absätze der Gletscherbäche in nächster Nachbarschaft des Eisrandes, Sande und grobe Geröllmassen, die sich über den anstoßenden Boden ausbreiteten (Sandr) und von rasch fließendem, durch Erosionsschlamm getrübten Wasser (hvitàar—Weißwasser) herbeigeführt wurden.

Während der Rückzugszeiten bildeten sich vielfach in Nordeuropa, in größerem Maßstab aber in Nordamerika Stauseen am Eisrand, Ansammlungen von Schmelzwassern, denen auf der einen Seite durch die Bodenschwelle der Endmoränen, auf der anderen durch das Eis der Abfluß verlegt war. In sie drangen deltaförmig die Hvitàbildungen ein, andererseits schlug sich ruhiger sedimentiertes Material, Sande und Tone in ihnen nieder. Die südlichsten Teile des Dwykakonglomerats in der Kapkolonie sollen in Süßwasserseen abgesetzt sein, die man sich vielleicht den quartären Stauseen ähnlich vorstellen könnte. Unter den Glacialtonen ist besonders bemerkenswert der Bänderton, ein auffallend fein geschichteter Ton, dem entweder winzig dünne Sandschichten in regelmäßigen engen Abständen eingelagert sind, oder der in jeder Schicht dieselbe Reihenfolge von Farbveränderungen wiederholt. Man hat die Bänderung mit Jahresringen

Digitized by Google

verglichen und durch Sedimentsveränderung infolge der jahreszeitlichen Verschiedenheit in der Zuflußgeschwindigkeit erklärt.

G. de Geer hat in sehr eingehender Untersuchung hieraus die Dauer und Schnelligkeit der Abschmelzung während der letzten Eiszeitstadien zu berechnen gesucht. Er fand, daß ungefähr 12 000 Jahre verflossen seien, seitdem das letzte Quartäreis Schonen verließ, und daß der jährliche Rückgang in Südschweden 50 m, bei Stockholm (übereinstimmend mit dem oben S. 86 angeführten Ergebnis) 250 m, und weiter nördlich 300 oder 400 m betragen habe.

Zu den fluvioglacialen Ablagerungen gehören auch die Ose (Åsar), langgestreckte Rücken, die aus gerolltem Gletscherschutt bestehen, oft Kreuzschichtung zeigen, also aus stark bewegtem Wasser abgesetzt sind. Ihre Richtung fällt ungefähr zusammen mit der Bewegungsrichtung des Eises; die ebenso gerichteten Drumlin unterscheiden sich von den Osen durch ihren kurz-elliptischen Grundriß, ihr schwarmartiges Auftreten und durch ihre Zusammensetzung aus Grundmoränenmaterial. Die Ose bilden vielmehr lange, in der Landschaft deutlich hervortretende Rücken, die sich auf Kilometerlänge, unabhängig von den sonstigen Bodenformen verfolgen lassen und zuweilen im Kartenbild an Flußsysteme mit spitzwinklig einmündenden Quellbächen erinnern. Diese topographische Gesamtgestalt legt die Deutung nahe, daß die Ose als Absätze subglacialer Schmelzwasserbäche entstanden seien durch Aufhöhung des Bettes zwischen den Wänden des Eistunnels. Eine andere Erklärung faßt sie auf als Deltabildungen an der erweiterten Mündung solcher Tunnel, wobei die Längenerstreckung als Folge alljährlicher Anstückelung beim Zurückweichen des Eisrandes erschiene. Für letzteres sprechen manche Einzelheiten im Aufbau, besonders eine Art von querserialer Anordnung des gröberen und feineren Schuttes.

Die fluvioglacialen Sedimente gehen in größerer Entfernung vom Eis in rein fluviatile Schotter, Sande und Tone über, die nur insofern hier kurze Erwähnung finden, als ihr Material zu einem Teil den Moränen entnommen ist. Aus demselben Grunde ist hier auch der Löß anzuführen, feinster kalkhaltiger Tonstaub, der im Gebiet des quartären Glacials in der Hauptsache den Moränen entnommen ist, und unter Bedingungen entstand, die als eine Nebenwirkung im Gefolge der Vereisung auftraten.

3b) Erosionen. *α*) Glättung usw. Die ungeheure Masse des von eiszeitlichen Gletschern verfrachteten Schuttes beweist eine gleichzeitige, sehr starke Erosion. Wenn auch die Kontinentalflächen vor der Eiszeit tiefgründig verwittert und aufgelockert gewesen sein werden, so bestehen doch die Moränen vorwiegend aus unverwittertem Material, das erst vom Eis losgebrochen und abgeschrämmt wurde. Die Erosionswirkungen sind sehr oft, auch unter den paläozoischen Moränen bemerkt worden, und zwar als Glättung und Polierung der festen Gesteinsoberflächen. Charakteristisch sind besonders die Rundhöcker, die im Liegenden des Dwykakonglomerats so gut wie in Skandinavien und sonst im Quartär erhalten sind, ferner die Schrammung und Streifung der polierten Flächen, der sicherste Anhaltspunkt, um die Richtung des Eisschubs zu bestimmen.

Aehnliche Schrammung zeigen viele Geschiebe, die Scheuersteine. Ihr Vorkommen gilt als bündigster Beweis dafür, daß eine moränenartige Bildung wirklich durch Eistransport und nicht als fluviatile oder marine Geröllschicht entstanden ist. Doch sind niemals alle Geschiebe „gekritzt", auch geht die Schrammung durch Verwitterung der Oberfläche oder bei weiterem Transport des Gerölls im Wasser verloren.

Die Facettengeschiebe, wie sie zuerst aus den Moränen der Saltrange bekannt wurden und längere Zeit als charakteristisch für die spätpaläozoische Eiszeit galten, finden sich auch in quartären Moränen, sind aber nirgends häufig. Sie zeigen mehrere, in scharfen Winkeln zusammenstoßende Schliffflächen, haben also unter dem Gletscher oder in einem vor oscillierenden Eisrändern gelegenem Steinpflaster der Grundmoräne eine Drehung erfahren, deren Ursache in lokalen Zufällen zu suchen sein wird. Für die Kenntnis der glacialen Erscheinungen sind diese Geschiebe bedeutungslos.

Lokalerscheinungen sind ferner die aus dem Gletschergarten bei Luzern, von Rüdersdorf und sonst in großer Zahl bekannten Riesentöpfe, entstanden durch den Strudel des in Gletschermühlen von der Oberfläche des Eises auf die Unterlage herabstürzenden Schmelzwassers. Auch den Söllen, kreisförmigen Seen von beträchtlicher Tiefe, die im lockeren Boden der norddeutschen Grundmoränenlandschaft nicht selten auftreten, wird die gleiche Entstehung zugeschrieben. Doch steht die Erklärung nicht recht im Einklang damit, daß mehrfach auch schrägstehende, also wohl nicht durch Wasserfall ausgebohrte oder „ausgekolkte" Kessel beobachtet sind.

β) Uebertiefte Täler usw. Den Erosionswirkungen kleineren Maßstabs, aber sicher glacialer Entstehung stehen andere gegenüber, die sich in der Landschaft vielfach formbestimmend ausprägen, deren Entstehung durch Eiserosion jedoch nicht unbestritten geblieben ist. Die Alpentäler, durch welche die quartären Gletscher austraten, sind übertieft, d. h. sie zeigen nur oberhalb der von Eiswirkungen betroffenen Zone die Gehängeneigung, die reifen Talformen und

Digitized by Google

der Gesteinsart entspricht; in der Tiefe ist die Sohle verbreitert, die Hänge sind übersteil und die Seitentäler fallen in einer scharfen Stufe zum Boden des Haupttals ab. Oberhalb der Stufe sind die Böden der Seitentäler flach geneigt. Denkt man sie in dieser Neigung bis in die Mitte des Haupttals fortgesetzt und in diesem von beiden Seiten her die Neigung der oberen Hänge nach unten verlängert, so treffen diese drei Flächen in einer Höhe zusammen, die annähernd die Lage der Haupttalsohle vor der Uebertiefung wiedergeben muß. Daß tatsächlich glaciale Erosion Ursache der Uebertiefung ist, geht außerdem noch hervor aus dem Auftreten von Riegeln, die in den Haupttälern zwar weniger auffallen als in den Nebentälern, aber doch deutlich vorhanden sind. Verfolgt man ein Seitental aufwärts, so findet man nicht selten, daß Steilabsätze gleich der Stufe zum Haupttal sich wiederholen. Hinter der Stufe ist der Talboden muldenartig vertieft und ausgeweitet, enthält auch oft einen See, so daß sich zwischen diesem und dem Steilabsatz eine Bodenschwelle, der Riegel befindet. Diese Talform ist charakteristisch für Gletschererosion und findet sich nur neben anderen Spuren der Gletscherwirkung; sie fehlt den allein durch fließendes Wasser ausgefurchten Tälern, wiederholt sich aber in den muldenförmigen Mitten der Zungenbecken und in den Fjorden, die demnach als unter den Meeresspiegel gesenkte Gletschertäler erscheinen.

Die Wertschätzung der Gletschererosion ist jedoch Gegenstand weitgehender Meinungsverschiedenheiten, in denen sich vielleicht Ueberschätzung auf der einen Seite, Unterschätzung auf der anderen die Wage halten. Da Fjorde nur an einstmals vergletscherten Küsten vorkommen und übertiefte Täler nur an den Zugstraßen alter Gletscher, so dürfte der — doch zweifellos vorhandenen — Gletschererosion die Ausschleifung und Ausgestaltung der speziellen Bodenform mit Bestimmtheit zuzuschreiben sein. Eine andere Frage ist, ob das Eis sich die Bahn selbst gebrochen oder nur die vorhandenen benutzt habe. Die erodierende Wirkung des Eises besteht im Abglätten und Schleifen, ist also, wie die Rundhöcker und viele Beobachtungen an Gletschern der Gegenwart zeigen, gering auf glatten Flächen, die dem Eis keine Unebenheiten und Ansatzstellen zur Abhobelung bieten. Solche werden aber in der Unterlage des Eises durch Spaltenfrost und subglaciale Verwitterung stets neu geschaffen und bis auf eine Art von Gleichgewichtsfläche wieder abgeglättet und ausgeschliffen. Es ist ohne weiteres anzunehmen, daß der Eisabfluß vorhandene Wasserrinnen bevorzugt haben wird, daß also die heutigen Fjorde und Alpentäler durch fluviatile Erosion angelegt und durch glaciale ausgeweitet und vertieft sind, in einer Art des Zusammen- oder Nacheinanderwirkens, die sich nicht generell abschätzen läßt.

Eine andere Art der Eiserosion zeigt sich in den Karen, Gebirgsformen der Gipfelregionen, die in steilwandig begrenzten Nischen mit einem flachen oder wannenförmig vertieften Boden bestehen. Sie umschließen vielfach einen See und sind durch einen Riegel oder Steilabsturz gegen das anschließende Tal abgegrenzt. Kare fehlen im Gebiet der Inlandvereisungen und bezeichnen in eiszeitlich-vergletscherten Gebirgen die obere Gletschergrenze. Die Karwände zeigen keine Spuren von Eiserosion, sondern verdanken ihre Entstehung der subaërischen Verwitterung. Sie sind die Reste der über das Eis hinausragenden Firngrate, während die Karböden als „Gletscherquellen" bezeichnet werden können.

Der Zusammenhang zwischen Gebirgsform und Vergletscherung ist für die Alpen von Penck und Brückner eingehend in Wort und Bild geschildert worden.

γ) Terrassen usw. Fluvioglaciale Erosion ist stark beteiligt an der Ausbildung der Landschaftsformen im Vorland der Vereisungen. Die Entstehung der Terrassen und ihre geologische Bedeutung wurde schon oben angemerkt. Weiterhin ist die Breite mancher Täler, die jetzt nur von unbedeutenden Gewässern durchflossen sind oder ganz trocken liegen, auf Erosion seitens der massenhaften Schmelzwässer des Quartär zurückzuführen.

In Norddeutschland läßt die Lage der Täler erkennen, daß der Strom, der die Schmelzwässer aufnahm, dem weichenden Eisrand folgend etappenweise sich nach Norden verlegte. Die Richtung dieser quartären Täler hat den heutigen Flüssen, die sämtlich auf lange Strecken von OSO nach WNW verlaufen, ihre Bahn vorgezeichnet.

In Nordamerika nahm der Mississippi einen beträchtlichen, wenn nicht den größten Teil der Schmelzwässer auf; sein Bett hat keine wesentliche Verlegung, wohl aber eine starke Einengung erfahren. Es gehört zu den Aufgaben der Geographie, den Zusammenhang zwischen den quartären und den gegenwärtigen Flußtälern im einzelnen aufzudecken. Die „Eiszeit" kommt dabei nur in Betracht, weil die erodierenden Wassermassen und das sedimentierte Material von Gletschern stammen.

3c) Schichtenstörungen usw. Wenn ein vorrückender Gletscher gegen eine feste Bodenschwelle stößt, so gleitet er über sie hinweg oder schleift sie zum Rundhöcker ab; eine Bodenschwelle aus lockerem Gestein, etwa eine Stirnmoräne, wird zunächst fortgeschoben, dann ebenfalls überstiegen und eingeebnet. Die lockere Decke eines festen, ansteigenden Bodens wird dagegen vom Eis wie von einem Pflug abgeschält und in Falten gestaucht.

Das quartäre Inlandeis hat in vielen Fällen kaum irgendeinen Einfluß auf lockere Untergrundschichten ausgeübt, in anderen

Digitized by Google

aber Stauchungen und Durchknetungen höchst verwirrter Art hervorgerufen. Diese Störungen haben jedoch nur lokalen Wert und sind dadurch entstanden, daß das Eis gegen eine Bodenschwelle oder beim Ueberqueren einer Bodensenke gegen die jenseitige Talwand, und zwar gegen lockeres Gestein gepreßt wurde.

In festem Gestein können durch Gehängeschub ähnliche Erscheinungen entstehen. Nach Frech treten glaciale Stauchungen auch in plastischen Gesteinen nur auf, solange der Eisdruck gering und der Boden nicht durchgefroren und fest geworden ist, also nur am Stirnrand des vorrückenden Eises oder dicht dahinter. Ist das Hindernis überwältigt, so bilden sich in dem durch Belastung und Frost starr gewordenen Grund nur die Erosionsformen festen Gesteins aus, Abschleifung und daneben Ueberschiebung.

Glaciale Ueberschiebung ist eine Art von Geschiebeaufnahme größeren Maßstabs, tritt aber zuweilen als Fortsetzung einer Stauchung auf infolge Aenderung der Schichtenplastizität. Manche Kreidevorkommnisse Norddeutschlands, die technisch abgebaut werden, stellen sich trotz ihrer Größe als überschobene Schollen dar.

Eine Stauchungserscheinung anderer Art sind die Staumoränen. Sie werden nicht als Wirkungen des vorrückenden Eises aufgefaßt, sondern sollen am Rande des stillstehenden Eises aufgepreßt worden sein, indem der frisch angeschüttete, bewegliche Untergrund nach der Seite minderer Belastung auswich und somit vor dem Eisrand nach oben durchbrach.

4. Ursachen der Eiszeiten. 4a) Methodologische Vorbemerkung. Der Frage nach dem Klima und den Ursachen der Eiszeiten kommt im Lehrgebäude der Geologie größere Bedeutung zu als den übrigen paläoklimatischen Problemen, denn diese pflegen nur als eine Art von Zugabe zur Darstellung der geologischen Verhältnisse einer Periode aufzutreten und die eigentliche Untersuchung geht ohne Beteiligung klimatischer Erwägungen vor sich. Hier aber, besonders bei der quartären Eiszeit wird die Deutung und Anordnung des Befundes vielfach stark beeinflußt durch Vorstellungen über die Beschaffenheit des glacialen und interglacialen Klimas. Es spricht nun nicht für die Berechtigung, in dieser Weise von der sonst üblichen Methode abzuweichen, daß noch jede zusammenfassende Darstellung schließlich Wesen und Ursache der Eiszeit für ein ungelöstes Rätsel erklären und den Mißerfolg der vielen auf dieses Thema verwendeten Mühe zugeben mußte. Dieser bedenkliche Zustand des ganzen Problems wird noch unterstrichen durch den Umstand, daß die Behandlungsweise sich überhaupt von der sonst gegenüber komplizierten Verhältnissen üblichen unterscheidet. Es hat sich sonst bewährt und gilt sogar als einzig zulässiger Weg, den leichtest angreifbaren, vollständigst bekannten Teil des Problems abzusondern, hierauf allein eine provisorische Theorie zu begründen und bis auf weiteres anzunehmen, daß die Lösung des zugänglichen der des unzugänglichen präjudiziere. Der Fortschritt geschieht dadurch, daß man auch zu den anderen Problemteilen Zugang zu gewinnen sucht und die erste Theorie nach Maßgabe der neuen Erfahrungen ergänzt, umgestaltet oder durch eine neue, umfassender gültige ersetzt. Dagegen gilt es vielfach für erforderlich, das eiszeitliche Problem als ganzes, mit einer alles auf einmal aufklärenden Theorie zu lösen. So kann man oft den Einwand hören, daß eine zur Erklärung eines Problemteils, etwa der quartären Eiszeit Europas, aufgestellte Theorie schon deshalb falsch sein müsse, weil sie andere Problemteile, etwa die quartäre Eiszeit Südamerikas, nicht miterkläre. Dabei wird aber nicht gefragt, zu welcher Theorie man denn gelangte, wenn man diese anderen Problemteile nach den für den ersten provisorisch bewährten Gesichtspunkten behandelte, sondern die in anderen Wissenschaften und auch sonst in der Geologie erfolgreiche Methode, dem Problem mit Hilfe provisorischer Theorien schrittweise näher zu rücken, wird von vornherein als unzulässig abgelehnt.

Der eingestandene Mißerfolg dieses Vorgehens stellt die anders, d. h. in der allgemein üblichen Art operierende Betrachtungsweise in den Vordergrund, wonach also hier Unvollständigkeiten des geologischen Befundes nur im Falle der Beobachtungsunmöglichkeit durch theoretisch-klimatische Erwägungen ergänzt werden dürfen und die Betrachtung mit dem bestbekannten Teil, den klimatischen Verhältnissen eines nordeuropäischen Inlandeises wie mit einem selbständigen Problem zu beginnen hat.

4b) Klima der Vereisungen. Das Ausgangsgebiet des nordeuropäischen Inlandeises liegt ungefähr in der Breite des heutigen grönländischen; es können also die klimatischen Verhältnisse des letzteren für die quartären Skandinaviens eingesetzt werden. Leider sind jedoch die Erfahrungen über die Metereologie Grönlands noch sehr unvollständig, besonders wissen wir zu wenig über die Höhe und die jahreszeitliche Verteilung der Niederschläge auf dem Eisgebiet selbst. Nur steht fest, daß die Gesamtmenge nicht sehr groß ist und doch ausreicht, um trotz der starken Abgabe durch Eisberge den gegenwärtigen Zustand aufrecht zu erhalten. Die Firn- und Eisanhäufung wächst zu solcher Mächtigkeit an hauptsächlich wegen des geringen Verlustes durch Abtauen und Verdunstung. Die Eisscheide liegt in Grönland gegen Osten verschoben, die niederschlagbringenden Winde kommen von Westen, also aus dem Gebiet des durchschnittlich niedrigeren Luftdrucks. Ein skandinavisches Inlandeis würde über sich eine starke Abkühlung der Luft hervorrufen und deshalb Winters und Sommers durch eine Antizyklone bezeichnet sein. Die Niederschläge wären zwar geringer als jetzt, aber weil zugleich die warmen, das Abtauen bewirkenden Winde teils fern gehalten, teils bald abgekühlt würden,

Digitized by Google

so bedürfte es wie jetzt in Grönland auch keiner starken Zufuhr, um den einmal bestehenden Zustand aufrecht zu erhalten. Die Eisscheide lag, obwohl östlich von der heutigen skandinavischen Wasserscheide, doch nahe dem Westrand des Eisgebietes; die Niederschläge kamen demnach von Ost und Südost und in dieser Richtung muß ein Streifen durchschnittlich geringeren Luftdrucks gesucht werden. Die skandinavische Antizyklone verlegte die jetzt meist eingeschlagenen Straßen der Minima und ließ nur die südlichen, an den Alpen vorüber und von da nach O und NO führenden offen, was die bezeichnete Abweichung von den heutigen Luftdrucksverhältnissen zur Folge haben mußte.

Lepsius erklärt die Lage von quartärer Eisscheide und heutiger Wasserscheide in Skandinavien durch die Annahme, daß im Quartär Eisscheide und Wasserscheide zusammengefallen sei, und daß durch schiefe tektonische Verschiebung im Untergrund die letztere seit dem Quartär nach Osten verlegt wurde.

Ein Inlandeis besitzt daher eine Art von Selbsterhaltungsfähigkeit, insofern als eine vorhandene Eisfläche sich bei genügender Größe die notwendigen klimatischen Bedingungen selber schafft. Damit steht im Einklang, daß in Skandinavien, je kleiner beim Rückgang der Vereisung die Eisfläche ward, desto mehr das Abschmelzen sich beschleunigte. Das grönländische Inlandeis würde sich weiter nach Osten und Süden ausdehnen können, wenn die Eisdecke über ein Festland weiter glitte, statt auf die Küste zu treffen und dort in Eisberge zu zerbrechen; es bedarf also keiner Sondererklärung, weshalb vom skandinavischen Zentrum, war dieses einmal eisbedeckt, die Gletscher die Breitenlage Grönlands nach Süden überschritten.

Die skandinavische Antizyklone und daher vermutlich auch deren quartäre Ursache, die Eisdecke, bestand, wie Harmer mit Beobachtungen belegt hat, schon zur Zeit des red crag. Daher ist die Ursache der Eiszeit auch nicht in Verhältnissen zu suchen, die erst im Quartär begannen; ohne Zweifel muß vielmehr dem kalten Meeresstrom, der sich gegen Ende des Tertiärs im Nordseegebiet bemerkbar macht, ferner der nachweislich damals größeren Höhe der skandinavischen Gebirge große Bedeutung für die erste Entstehung der skandinavischen Vergletscherung beigelegt werden, wenn man nicht überhaupt hierin die ausreichende und einzige Ursache davon zu erblicken hat.

Wie von meteorologischer Seite oft hervorgehoben, bietet es bis hierher keine prinzipiellen Schwierigkeiten, die Entstehung und Ausdehnung eines skandinavischen Inlandeises durch die heutigen klimatischen Faktoren zu erklären, denn es ist mit geologischen Beobachtungen zu belegen, daß sich seit dem Pliozän Skandinavien klimatisch in der Lage des heutigen Grönland befand. Die Fortdauer dieses Zustandes im Quartär, kombiniert mit der Fähigkeit großer Eisflächen sich selbst zu erhalten und noch auszudehnen, weil alle Niederschläge infolge der Abkühlung der Luft in fester Form fallen, erklärt den Umfang dieses Inlandeises; als die heutigen geographischen Zustände sich herstellten und der kalte Meeresstrom aus den europäischen Gewässern verschwand, und zwar infolge von marin-geographischen Veränderungen, die sich, wie an anderer Stelle bemerkt (vgl. den Artikel „Paläoklimatologie" 2a, γ), weder in den Küstengebieten Europas noch unter wesentlicher Umgestaltung der Festlandsumrisse vollzogen zu haben brauchen, mußte nach dem Aufhören der Hauptursache die Vereisung erst allmählich, dann beschleunigter zurückgehen.

Außerdem erfuhr Skandinavien während der Eiszeit eine starke Absenkung, vielleicht infolge der Eislast, doch ist nicht abzuschätzen, ob die Oberfläche des mit einer mehr als 1000 m mächtigen Eisschicht bedeckten Landes nun wesentlich tiefer lag und mit geringerer Fläche in die Schneeregion aufragte, als die des unvereisten im Pliozän. Von dem Gedanken, daß die Eiszeit sich sozusagen ihr Ende selbst bereitet habe, nimmt man besser Abstand.

Schreitet man auf diesem Wege fort, so ergibt sich zunächst, daß die auf die südlicheren Zugstraßen gedrängten Zyklonen dort die Niederschlagsmenge erhöhen, also Pluvialzeiten und auf den Gebirgen lokale Eiszeiten hervorrufen mußten, letzteres soweit durch den kalten Küstenstrom die Lufttemperaturen erniedrigt und die Schneegrenze herabgedrückt wurde. Nun stammt aber nach A. Woeikof, der in dieser meteorologisch-paläoklimatischen Betrachtungsweise zuerst mit Nachdruck vorgegangen ist, die Feuchtigkeit der inländischen Winde nicht vom Meer, sondern diese wird an den Küsten schon fast völlig abgefangen und später durch neue, über feuchten Landstrecken aufgenommene ersetzt. Die Tatsache, daß die Alpen im Norden stärker als im Süden vergletschert waren, und die Lage der Eisscheide, die sich zwar nördlich der heutigen Wasserscheide, aber doch dem Südrand des vereisten Gebietes genähert findet, verweist darauf, daß die Zufuhr der Niederschläge aus Norden und weniger aus dem mediterranen Pluvialgebiet und dem dortigen Streifen durchschnittlich niederen Luftdrucks erfolgte. Die von Norden kommenden Winde strichen aber während der Abschmelzperiode des nordischen Inlandeises über ein viel feuchteres Land als vorher während dessen größter Ausdehnung. Daher ist von meteorologischer Seite oft behauptet worden,

Digitized by Google

daß die stärkste Ausdehnung der Alpenvereisung erst begonnen habe, als die des nördlichen Europas im Verschwinden war. Weiterhin ergibt sich, wie Harmer ausgeführt hat, daß bei solcher Betrachtungsweise ein Alternieren der Vereisungen in Europa und in Nordamerika angenommen werden müsse.

Wäre es nun mehr als Arbeitshypothese, daß die Vereisungen überall zeitlich zusammenfallen, so würde mit diesen letzten Ergebnissen der Versuch einer meteorologischen Erklärung sein Scheitern bewiesen haben. Bis jetzt wird aber dadurch nur die Grenze bezeichnet, über die hinaus jedes weitere Folgern ein zweckloses Aneinanderreihen von leeren Vermutungen wäre. Man könnte nur dann berechtigt sein, zwecks meteorologischer Erklärbarkeit eine Ungleichzeitigkeit in bestimmter Reihenfolge der quartären Eiszeiten an ihren verschiedenen Zentren einzusetzen, wenn geologische Beobachtung, unabhängig von aller Rücksicht auf Klimafragen, gezeigt hätte, daß die Eiszeit der Alpen mit der nordeuropäischen in einer Weise zusammenhängt, die eine meteorologische Erklärung begünstigt. Auch müßte festgestellt sein, welche der nordischen Moränen sich nach England oder wenigstens bis Holland ausdehnt, ehe die zeitlichen Beziehungen zwischen der skandinavischen und der großbritannischen Vereisung geprüft werden können. Solange jedoch hierüber Nachweise oder Gegenbeweise fehlen, besitzt die eben vorgetragene Theorie auch für Skandinavien nur provisorischen Wert; immerhin eröffnet sie schon jetzt manchen Ausblick auf wirkliche Erklärungsmöglichkeiten und stützt sich mehr als die sonstigen Theorien auf bekannte und der Beobachtung zugängliche Klimafaktoren.

Nach Lepsius sind die alpinen Terrassen überhaupt nicht mittelbare Glacialwirkungen, sondern Folge tektonischer Ereignisse im Mittelrheingebiet. Dann wäre der Versuch, die schweizer Terrassen bis an die niederrheinischen Moränen zu verfolgen, zwecklos.

Die Höhe der Schneegrenze ist im groben abhängig von der geographischen Breite: sie senkt sich, je näher den Polen, desto mehr auf Meeresniveau herab. Im einzelnen wird sie bestimmt durch klimatische Faktoren, die ihrerseits letzten Endes mit der Lage zum Meer, den geographisch-klimatischen Verhältnissen in diesem Meer und mit der Luftzirkulation zusammenhängen. Die Größe der Gletscher ist hauptsächlich bestimmt durch die Größe der Firnfelder und die Lufttemperaturen, da das untere Ende der Gletscher sich an der Stelle befindet, wo Eiszufuhr und Abtauung sich die Wage halten. Zunahme der Gletscher kann erfolgt sein erstens wegen Vergrößerung der Firnfelder infolge allgemeinen oder örtlich bedingten Herabsinkens der Schneegrenze oder Aufsteigens des Landes und Erweiterung der über die unverändert stehende Schneegrenze aufragenden Fläche; zweitens wegen Verminderung der Abtauung infolge allgemeiner oder örtlich bedingter Temperaturherabsetzung des Sommers. So viele Bedingungen, so viele Möglichkeiten auch, Veränderungen anzunehmen; daher entsteht eine unübersehbare Fülle von Hypothesen, Varianten und Kombinationen zur Erklärung der Eiszeit. Dagegen ruft, wie das Beispiel des jetzt wie im Quartär unvergletscherten Ostsibiriens zeigt, strenge Kälte des Winters oder des ganzen Jahres für sich allein noch keine Eiszeit hervor.

Wenn man die Ungleichzeitigkeit der Vereisungen in Betracht ziehen darf, so wären vielleicht die „postglacialen" Schichten Islands und der Arktis mit ihrer jetzt weiter südlich lebenden marinen Fauna zum Teil nicht dem skandinavischen „Postglacial" gleichzusetzen, sondern entsprächen der dortigen Eiszeit. Sie bezeugten dann eine Art der marinen Zirkulation, wie sie an anderer Stelle (vgl. den Artikel „Paläoklimatologie" 2a, γ) als Ergebnis eines an der europäischen Küste entlang fließenden kalten Stromes entwickelt wurde. Der Vorstoß wärmeren Klimas in Nordeuropa, der dem Rückgang des Eises folgte, wäre dann davon getrennt zu halten.

Das Ende der nordeuropäischen Eiszeit wäre am einfachsten durch die Annahme zu erklären, daß noch im Quartär eine Senkung zwischen Grönland und Labrador den kalten Wassern einen Ausfluß an der amerikanischen Seite des atlantischen Ozeans eröffnete und so den heutigen Zustand herstellte.

4c) Klima des Interglacials und der Schwankungen. Die für klimatische Zwecke wichtigsten Interglacialbildungen Norddeutschlands bestehen in Austernbänken und anderen marinen Schichten mit einer an die heutige Nordsee gemahnenden Fauna, ferner in terrestrischen Ablagerungen mit Tieren und Pflanzen, die im großen und ganzen auch gegenwärtig in diesen Gegenden auftreten könnten. In den Alpen sind besonders hervorzuheben die — zwar nicht zahlreichen — Vorkommnisse mit Rhododendron ponticum, die, wie z. B. die Höttinger Breccie, meistens zwischen Riß- und Würmeiszeit gestellt werden.

Zwar können die Existenzbedingungen auch lebender Tiere und Pflanzen nicht ohne weiteres sichere Schlüsse auf das Klima ihrer vorzeitlichen Standorte gewährleisten; auch bleibt in vielen Fällen die Altersbestimmung noch zweifelhaft, besonders besteht manches norddeutsche „Interglacial" aus verschleppten Schollen und ist nachweislich präglacialen Alters. Indessen bleibt genügender Anlaß zu dem Schluß, daß wenigstens vorübergehend während der Eiszeit nicht ein ausgesprochen grönländisches, sondern ungefähr das heutige dort herrschende Klima in den Vereisungsgebieten bestand. Die einfachste Folgerung hieraus ist, daß das Eis sich zeitweilig ganz zurückzog, in den Alpen bis in die Gipfelregion, im Norden mindestens bis Skandinavien. Oscillationen dieses Umfangs lassen sich durch rein meteorologische

Digitized by Google

Faktoren nicht erklären, wenn man nicht zu der ganz unwahrscheinlichen Annahme greifen will, daß die Senkungen und Hebungen des Festlandes sich in Skandinavien und zwischen Europa und Amerika mehrere Male in genau derselben Weise wiederholt hätten. Man wäre also gezwungen, die Ursache der Vereisung in kosmischen, außerhalb der Erde liegenden Veränderungen zu suchen, würde dann die in verschiedenen Gegenden beobachteten Schwankungen des Eisrandes für Wirkungen derselben Ursache und für gleichzeitig erklären, gelangte also zu einer Anschauung über das Wesen der Eiszeit, die früher als brauchbare Arbeitshypothese der Stratigraphie bezeichnet wurde. Rechnet man also mit mehrfachen Vereisungen und durchgreifenden, gleichzeitigen Interglacialstufen, so stützt man sich weniger auf geologische Beobachtung, als auf abgeleitete Schlüsse über die Existenzbedingungen der interglacialen Tiere und Pflanzen. Keiner dieser Schlüsse ist aber so fest begründet, daß er noch aufrecht erhalten werden könnte, wenn die Untersuchung der Lagerungsverhältnisse die Ungleichzeitigkeit der alpinen und nordeuropäischen Vereisung bewiese. Außerdem hat diese verbreitete Anschauung über das Wesen der Eiszeit es noch nicht vermocht, eine erkennbare, der Beobachtung und Prüfung zugängliche Angabe über die Art der behaupteten kosmischen Veränderung aufzustellen. Die mit einmaliger Vereisung und lokalen Schwankungen rechnende Theorie zieht hauptsächlich dadurch an, daß sie einen Ausblick auf Verständnis der Ursachen eröffnet; ihre Schwäche liegt darin, daß man sich Rhododendren in den Alpen und in Norddeutschland Pappel und Linde nur ungern als Bewohner eines durch Eisnachbarschaft abgekühlten Landes denkt.

Es ist unverkennbar, daß die geographische Lage der vereisten Gebiete als Ursache in Betracht zu ziehen ist, läßt sich doch sogar bei der spätpaläozoischen Eiszeit noch bemerken, daß die Küste der damaligen Meere nicht weit von den Inlandsvereisungen entfernt war. In Nordamerika wie in Skandinavien gingen die quartären Gletscher von hochgelegenen, nachher gesenkten und wieder aufgestiegenen Gebieten aus, wenngleich Lepsius, der nur mit diesem Faktor rechnet, wohl dessen Bedeutung überschätzt, anderes aber unterschätzt. Trat die Maximalvereisung gleichzeitig in Europa und in Nordamerika oder gar überall auf der Erde ein, so müssen die meteorologischen Faktoren nicht nur durch einen hinzutretenden hypothetischen ergänzt, sondern teilweise durch ihn geradezu aufgehoben gewesen sein, weil die Niederschlags- und Wärmemenge konstant bleibt und durch eine Veränderung im Zusammenwirken jener klimatischen Faktoren nur anders verteilt wird; eine Vermehrung an einem Ort gleicht sich aus durch eine Verminderung an einem anderen. Ein hypothetischer Faktor müßte ferner erklären, weshalb zwar auf den meisten Festländern Abkühlung und Vermehrung der Niederschläge eintrat, aber die Verbreitung des klimatisch empfindlichsten Faunenbestandteils der tropischen Meere, z. B. der Riffkorallen nicht beeinflußt wurde. Ein solcher Einfluß ist nie behauptet oder nachgewiesen und ebensowenig ein derartiger Klimafaktor auch nur hypothetisch namhaft gemacht worden, vielmehr hätte alles, was als kosmische Ursache der Eiszeit angeführt wird, auch die Tropen abkühlen und die dortige Fauna einengen müssen. Schließlich obliegt der Theorie von der mehrfachen Vereisung durch kosmische Faktoren der Nachweis, daß geologische Beobachtung in allen Glacialgebieten zu dem gleichen, an dem typischen Gebiet konstatierten System von Eiszeiten und Interglacialen führt. Bisher ist nur versucht worden, ein System hypothetisch von einem Gebiet auf ein anderes zu übertragen und stets haben gewichtige Stimmen mit höchster Energie bestritten, daß die Tatsachen sich dem übertragenen System einfügen ließen.

Ebenso hat auch die Theorie von der Einheit der Eiszeit den Beweis ihrer Berechtigung noch zu erbringen und hat nachzuweisen, in welcher Weise die Schwankungen des Eisrandes im einzelnen geschahen, ferner, daß die Interglacialbildungen entweder wirklich teils präglacial, teils postglacial sind, oder, wenn der Vereisung gleichzeitig, in ihrem Nebeneinander von Wäldern und Steppen unter den klimatischen Bedingungen, wie sie in der Nachbarschaft eines Inlandeises herrschen, entstanden sein können, eine Aufgabe, mit deren Lösung sich hauptsächlich E. Geinitz beschäftigt hat.

Vorläufig stehen sich also zur Erklärung der quartären Eiszeit zwei Hypothesen entgegen, die vorbildlich sind für die Betrachtung der älteren Eiszeiten, aber trotz der Entschiedenheit, mit der sie zuweilen verteidigt werden, bisher nichts als Denkmöglichkeiten vorstellen. Jede von ihnen hat ihre stärksten Wurzeln dort, wo die andere schwach begründet ist. Unstreitig ist die „polyglacialistische" bestechender, weil sie zu praktischer Verwendung als Arbeitshypothese taugt und ein sozusagen grandioseres Bild der quartären Erdgeschichte entwirft. Die „monoglacialistische" stellt dem nur ein in den Einzelheiten noch verschwimmendes Bild entgegen, das an Stelle gewaltiger Allgemeinvorgänge ein lokales Nacheinander ähnlicher Erscheinungen bringt und erst klarer ausgestaltet und gruppiert werden kann nach Hinzufügung zahlloser, schwer übersichtlicher Einzelheiten geologischen, klimatologischen und bionomischen Inhalts. Eine Entscheidung auf tatsächlichem Boden ist somit noch unerreichbar; die Hauptschwierigkeit besteht darin, daß dem Geologen das meteorologische Element, dem Meteorologen umgekehrt das geologische zu wenig vertraut ist und deshalb minder gewichtig scheint. Jedoch ist vom methodologischen Standpunkt aus die heute meist anerkannte Vorstellung mehrfach wiederholter Eiszeiten angreifbar, solange sie die

Digitized by Google

behaupteten Vorgänge auf eine dem Wesen nach unbekannte und unkontrollierbare Ursache zurückführt, denn so erfüllt sie die Forderung nicht, die an eine wissenschaftliche Lehre zu allererst gestellt werden muß: beobachtete Tatsachen durch Zurückführung auf eine Ursache und durch Schlüsse auf das Wesen und die Wirkungsgesetze von Naturkräften wirklich zu erklären. Wohl mögen Kräfte existieren, deren Wirkungen wir nur aus der Vorzeit der Erde kennen, aber in der Gegenwart bisher noch nicht herausfinden konnten, jedoch hat sich auch schon oft gezeigt, daß nur deshalb auf vorzeitliche Mitwirkung von jetzt unbekannten Faktoren geschlossen wurde, weil der Beobachtungsstoff naturwidrig angeordnet war und es deshalb schien, als reichten die aus anderen Zusammenhängen sehr wohl bekannten Naturkräfte zur Aufklärung des angeblich unlösbaren, in Wirklichkeit nur mißverstandenen oder verunstalteten Problems nicht aus.

Literatur. **E. Haug**, *Traité de géologie II. Paris 1908 bis 1911.* — **J. Geikie**, *The great Ice Age. 3. Aufl. London 1894.* — **F. E. Geinitz**, *Das Quartär Nordeuropas. Lethaea geognostica III, Bd. 2. Stuttgart 1903 bis 1904.* — **Derselbe**, *Die Einheitlichkeit der quartären Eiszeit. Neues Jahrbuch f. Mineralogie usw. Beilage Bd. XVI, 1903.* — **Derselbe**, *Die Eiszeit. Braunschweig 1906.* — **F. Wahnschaffe**, *Die Oberflächengestaltung des norddeutschen Flachlandes 3. Aufl. Stuttgart 1909.* — **R. Lepsius**, *Geologie von Deutschland Bd. II. Leipzig 1910.* — **Derselbe**, *Die Einheit und die Ursachen der diluvialen Eiszeit in den Alpen. Abhandl. d. großherzogl. hess. geol. Landesanstalt zu Darmstadt Bd. V, 1910.* — **A. Penck und E. Brückner**, *Die Alpen im Eiszeitalter. Leipzig 1909.* — **G. F. Wright**, *The Ice Age in North America. 5 th ed. Oberlin Ohio 1911.* — **W. Stevers**, *Die heutige und die frühere Vergletscherung Südamerikas. Verhandlungen der Ges. deutscher Naturforscher und Aerzte 1911.* — **F. Frech**, *Die dyadische Eiszeit der Südhemisphäre. Lethaea geognostica I, Bd. 2, 1902.* — **E. Koken**, *Indisches Perm und die permische Eiszeit. Neues Jahrbuch für Mineralogie usw. Festband 1907.* — **E. Philippi**, *Das südafrikanische Dwykaconglomerat. Zeitschr. d. Deutschen geol. Ges. Bd. 55, 1904.* — **T. W. E. David**, *Conditions of climate at different geological epochs with special reference to glacial epochs. Compte rendu des X. internationalen Geologen Congresses 1906.* — *Zu vergleichen sind auch die im Artikel „Paläoklimatologie" genannten Werke und der Artikel „Eis".*

M. Semper.

Eiweißkörper.

1. Einleitung und Definition. 2. Primäre Spaltungsprodukte. 3. Konstitution. 4. Zusammensetzung aus den einzelnen Aminosäuren. 5. Fermente. 6. Sekundäre Spaltungsprodukte. 7. Reaktionen. 8. Albumosen und Peptone. 9. Eiweißsalze. 10. Halogeneiweiße und Verwandtes. 11. Physikalische Eigenschaften der Eiweißkörper. 12. Spezieller Teil. Einteilung. a) Einfache Eiweiße. Albumine, Globuline, Alkohollösliche Eiweiße, Histone, Protamine, Gerüsteiweiße (früher Albuminoide genannt). b) Umwandlungsprodukte. Acidalbumin und Alkalialbuminat. Albumosen. Peptone. Peptide. Halogeneiweiß usw. c) Proteide, Phosphoproteide, Nucleoproteide, Hämoglobin, Glycoproteide.

1. Einleitung und Definition. Die Eiweißkörper oder Proteinstoffe bilden eine scharf abgegrenzte Klasse von organischen Verbindungen, die in ihrem natürlichen Vorkommen und in ihren Eigenschaften seit lange bekannt sind, und deren Konstitution in ihren Grundzügen erforscht ist. Sie bestehen aus Kohlenstoff, Wasserstoff, Sauerstoff, Stickstoff und Schwefel in einem ziemlich konstanten Verhältnis und setzen sich in der Hauptsache aus bestimmten α-Aminosäuren zusammen, die als Säureamide miteinander verkoppelt sind. Diese Struktur gibt ihnen eine solche Gleichartigkeit des chemischen Verhaltens, daß man über die Zugehörigkeit eines Körpers zu der Klasse kaum jemals im Zweifel sein kann. Synthetisch dargestellt sind bisher nur die allerersten Glieder der Reihe.

Historisch hat man mit dem Namen „Eiweißkörper zuerst die kolloidalen Eiweißkörper bezeichnet, die in der Natur vorkommen und den größten und wichtigsten Teil der lebenden Pflanzen und Tiere bilden. Erstens enthalten die Flüssigkeiten der Tiere und Pflanzen, Blut, Lymphe, Zellsaft usw., Eiweißkörper in gelöster Form. Zweitens bilden die Eiweißkörper, der Hauptmasse nach Proteide, zusammen mit anderen organischen und unorganischen Substanzen das merkwürdige, zwischen dem festen und flüssigen Aggregatzustande in der Mitte stehende Gemenge von eigenartiger Struktur, das man das lebendige Protoplasma der tierischen und pflanzlichen Zellen und Gewebe nennt. Aus den Organen lassen sich die Eiweißkörper teils durch einfaches Auflösen, teils aber nur durch stärker verändernde Eingriffe in Lösung bringen. Ein dritter Teil der Eiweißkörper ist als Ernährungsmaterial wachsender Embryonen in Pflanzensamen und den Eiern von Tieren, in fester, zum Teil kristallinischer Form abgelagert.

Später fand man, daß im Tierkörper weit verbreitet Stoffe vorkommen, die in Zusammensetzung und Reaktionen mit den Eiweißkörpern nahe übereinstimmen, sich aber physikalisch dadurch von ihnen unterscheiden, daß sie feste Körper sind, und die Gerüstsubstanzen der Tiere bilden. Sie wurden als „eiweißähnliche Körper" oder Albuminoide bezeichnet, während wir heute keinen Grund haben, sie von den übrigen

Digitized by Google

natürlichen Eiweißkörpern zu trennen. Eine weitere Ausdehnung erfuhr der Begriff, als man Körper kennen lernte, die aus der Verbindung eines Eiweißkörpers mit einem anderen chemischen Körper bestanden. Sie werden in der deutschen Literatur allgemein als Proteide bezeichnet.

Die beiden Gruppen der nativen oder einfachen oder Eiweißkörper im engeren Sinne und der Proteide oder zusammengesetzten Eiweißkörper kommen in der Natur vor. Ihnen gegenüber stehen die eiweißartigen Spaltungsprodukte und Derivate, die Albumosen, Peptone usw., die chemisch durchaus Eiweißkörper sind, sich von den anderen Eiweißen aber durch den Mangel des kolloidalen Charakters und durch ihren Ursprung unterscheiden. Sie kommen einmal in der Natur, als Produkte der Verdauung und des Stoffwechsel vor, sodann werden sie künstlich durch Spaltung der anderen Eiweiße dargestellt. Ihnen schließen sich die synthetischen Peptide an.

Ein Synonym für Eiweißkörper ist „Proteine", wovon sich Bezeichnungen wie proteolytisch usw. ableiten. Das früher gebrauchte Wort „Albuminstoffe" ist nicht mehr üblich, da es zu Verwechselungen mit den Albuminen, einer bestimmten Gruppe von Eiweißen, führt. Die Bezeichnung „Proteide" wird im Deutschen für die zusammengesetzten Eiweiße reserviert. Im Englischen wurde bisher der Ausdruck „Proteids" für alle Eiweißkörper im weitesten Sinne gebraucht, neuerdings haben sich die englischen und amerikanischen physiologischen Chemiker geeinigt, die Eiweißkörper „Proteins" zu nennen, die in „simple", „conjugated" und „derived proteins" zerfallen. Im Französischen ist der Name „Substances albuminoides" für alle Eiweißkörper üblich und nicht etwa für die Gerüsteiweiße, die im Deutschen früher Albuminoide genannt wurde. Doch sind auch Ausdrücke üblich, die sich von „protéine" ableiten.

2. Primäre Spaltungsprodukte. Um die Konstitution des Eiweiß zu erforschen, hat man das Eiweißmolekül bis zum Verschwinden seines chemischen Charakters zerlegt und die dabei entstehenden Spaltungsprodukte untersucht. Die Zerlegung geschieht durch Kochen mit Säuren oder Alkalien, durch Oxydation mit Wasserstoffsuperoxyd, durch Schmelzen mit Kali, durch die Einwirkung überhitzten Wasserdampfes, durch tierische und pflanzliche Fermente oder den Stoffwechsel lebender Organismen. Bei allen diesen Prozessen entsteht zunächst eine Reihe von Körpern, die noch mehr oder weniger den gleichen chemischen Bau besitzen wie das ursprüngliche Eiweiß, und die daher zu den Eiweißkörpern im weiteren Sinne gerechnet werden, die Albumosen, Peptone, Peptide usw. Diese aber zerfallen wieder in Körper ganz anderer Art, die man im Gegensatz zu ihnen als kristallinische oder abiurete Spaltungsprodukte bezeichnet. Beide Namen sind nicht mehr korrekt, seit man kristallisierende Eiweißkörper und Peptone kennt, und seit zwischen den Peptonen, die die Biuretreaktion geben, und den einfachen Spaltungsprodukten eine Reihe von Uebergangsgliedern bekannt geworden sind. Doch werden beide Namen noch vielfach angewendet.

Unter der großen Zahl der einfachen Spaltungsprodukte nehmen einen besonderen Rang diejenigen ein, die beim Kochen mit Salz- oder Schwefelsäure oder durch die Verdauungsfermente von der Art des Trypsins entstehen, die primären Spaltungsprodukte. Bei dieser Spaltung bleiben die Kohlenstoffketten unversehrt und es wird lediglich die Bindung gelöst, die sie aneinanderknüpft. Andererseits ist es E. Fischer gelungen, zwei und mehr dieser primären Spaltungsprodukte zu Säureamiden zusammenzufügen, die den einfachsten Eiweißkörpern, den Peptonen, nahe stehen. Es kann keinem Zweifel unterliegen, daß die primären Spaltungsprodukte im Eiweißmolekül sozusagen präformiert sind, seine Bausteine darstellen.

Von den folgenden Spaltungsprodukten dürfen wir nach unseren heutigen Kenntnissen annehmen, daß sie im Eiweiß präformiert sind:

1. Aminoessigsäure, Glykokoll, $C_2H_5NO_2$.
2. α-Aminopropionsäure, Alanin, $C_3H_7NO_2$.
3. α-Aminoisovaleriansäure, Valin, $C_5H_{11}NO_2$.
4. α-Aminoisocapronsäure, α-Aminoisobutylessigsäure, Leucin, $C_6H_{13}NO_2$.
5. α-Aminoisocapronsäure, α-Amino-β-methyläthylpropionsäure, Isoleucin, $C_6H_{13}NO_2$.
6. α-Aminobernsteinsäure, Asparaginsäure, C_4HgNO_4.
7. α-Aminoglutarsäure, Glutaminsäure, $C_5H_9NO_4$.
8. α-Pyrrolidincarbonsäure, Prolin, $C_5H_9NO_2$.
9. α-Oxypyrrolidincarbonsäure, $C_5H_9NO_3$.
10. Phenyl-α-aminopropionsäure, Phenylalanin, $C_9H_{11}NO_2$.
11. p-Oxyphenyl-α-aminopropionsäure, Tyrosin, $C_9H_{11}NO_3$.
12. Indol-α-aminopropionsäure, Tryptophan, $C_9H_{11}N_2O_2$.
13. Imidazol-α-aminopropionsäure, Histidin, $C_6H_9N_3O_2$.
14. $\alpha.\delta$-Diaminovaleriansäure, Ornithin, $C_5H_{12}N_2O_2$.

Digitized by Google

15. α-,ε-Diamino-n-capronsäure, Lysin, $C_6H_{14}N_2O_2$.

16. α-Amino-β-oxypropionsäure, Serin, $C_3H_7NO_3$.

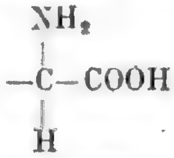
17. α-Diamino-β-dithiodilaktylsäure, Cystin, $C_6H_{12}O_4N_2S_2$.

18. Harnstoff, CH_4ON_2.

19. Ammoniak, NH_3.

Ornithin und Harnstoff sind zu dem Arginin vereinigt. Die Bindung zwischen ihnen wird durch Kochen mit Säuren und die Fermente Trypsin und Erepsin nicht gelöst, und bei diesen Spaltungen erscheint an Stelle von Ornithin und Harnstoff als Spaltungsprodukt das Arginin.

Die Spaltungsprodukte der Eiweißkörper sind alle α-Aminosäuren, und die Gruppe



bestimmt ihr und damit auch der Eiweißkörper chemisches Verhalten.

Für die Eiweißchemie kommen insbesondere folgende Eigenschaften der α-Aminosäuren in Betracht:

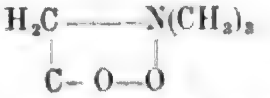
1. Sie sind amphotere Elektrolyte und können daher mit Säuren wie mit Basen Salze bilden, die aber stark hydrolytisch dissoziiert sind.

2. Durch Besetzung, sei es der sauren oder basischen Gruppe, kann ihnen dieser Doppelcharakter genommen werden; es entstehen Körper, die entweder nur Säuren oder nur Basen sind.

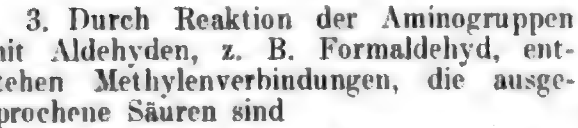
a) Glykokoll und die anderen Aminosäuren bilden mit Alkoholen Ester, die Basen sind

$$CH_2NH_2COOH + C_2H_5OH = CH_2NH_2CO.O.C_2H_5.$$

b) Glykokoll und die anderen Aminosäuren bilden durch Methylierung die synthetischen Betaine, die ebenfalls deutlich basisch sind

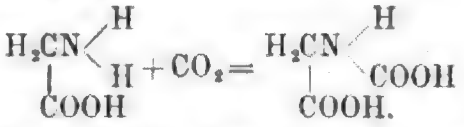


3. Durch Reaktion der Aminogruppen mit Aldehyden, z. B. Formaldehyd, entstehen Methylenverbindungen, die ausgesprochene Säuren sind



Die Aminosäuren sind neutrale Körper, die Methylenverbindungen Säuren, und so kann das Sauerwerden einer Lösung beim Zusatz von Formol zum Nachweis von Aminosäuren z. B. im Harn dienen.

4. Durch Anlagerung von Kohlensäure an die Aminogruppe entstehen Carbaminosäuren (Carbaminoreaktion):

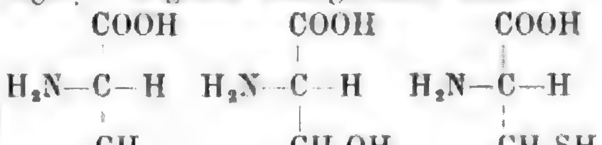


Bei alkalischer Reaktion entstehen die Salze der betreffenden Carbaminosäure.

Die Aminosäuren aus Eiweiß sind mit Ausnahme des Glykokolls, alle optisch aktiv; durch Kochen mit Alkali werden sie racemisiert, und zwar verschieden leicht. Noch leichter werden sie im allgemeinen racemisiert, solange sie noch im Gefüge des Eiweißmoleküls stecken.

Die Salze der Aminosäuren mit Säuren oder Basen haben ein von den freien Aminosäuren verschiedenes, ja bisweilen das entgegengesetzte Drehungsvermögen. Da die Salze stark hydrolytisch dissoziiert sind, wechselt das Drehungsvermögen mit dem Gehalt an Salzsäure und wird erst bei sehr großem Salzsäureüberschuß einigermaßen konstant, ist dann aber auch sehr charakteristisch und wird besonders häufig zum Beweise der Reinheit der Aminosäuren benutzt. Zur Bestimmung der Polarisation sind die Aminosäuren daher meist in Salzsäure von 21 % gelöst worden, bisweilen auch in Natronlauge.

Die Bezeichnung der Aminosäuren als rechts- und linksdrehend (d- und l-) erfolgt nach ihrem Drehungsvermögen in wässeriger, neutraler Lösung. Eine rationelle, genetische Bestimmung der sterischen Konfiguration ist bisher nur für Serin, Cystein und Alanin gelungen, die — auf Traubenzucker bezogen — folgende Konfiguration haben:



Alanin Serin Cystein

Dabei ist Alanin rechts-, Serin und Cystein linksdrehend.

Das Glykokoll, das daher seinen Namen hat, und die anderen α-Aminosäuren schmekken süß, während die β- und γ-Aminosäuren geschmacklos sind. Doch beschränkt sich der Süßgeschmack bei einigen Aminosäuren auf eines der beiden Stereoisomeren. Beim Leucin schmeckt das im Eiweiß vorkommende l-Leucin fade und schwach bitter, das d-Leucin stark, das d,l-Leucin schwach süß.

Von den Spaltungsprodukten zeigen Tyrosin, Tryptophan, Histidin und Cystin charakteristische Farbenreaktionen (vgl. Abschn. 7).

1. Tyrosin.

a) die Millonsche Reaktion.

Digitized by Google

b) die Diazoreaktion,

c) Dunkelfärbung durch Tyrosinase.

2. Tryptophan.

a) Adamkiewicz-Hopkinsche Reaktion.

b) Tryptophanreaktion, Violettfärbung beim Zusatz von Brom- oder Chlorwasser und Essigsäure. Wird nur von isoliertem Tryptophan gegeben, und dient daher zum Nachweis der Zerlegung des Eiweißes.

3. Histidin.

a) die Diazoreaktion wie das Tyrosin.

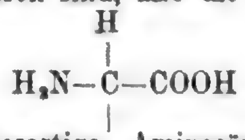
b) Bromwasser, wird durch Histidin erst entfärbt, dann gelb, beim Erhitzen erst farblos, dann weinrot.

Tyrosin und Leucin haben charakteristische Kristallformen, alle anderen Aminosäuren müssen zu ihrer Identifizierung isoliert werden. Für das Arginin, Lysin und Histidin geschieht das durch Fällung mit Phosphorwolframsäure, die diese stark basischen Stoffe wie andere organische Basen niederschlägt und weiterhin nach einem von Kessel herrührenden sehr genauen Verfahren. Die Monoaminosäuren werden nach Emil Fischer mit Salzsäure und Alkohol verestert, die basischen Ester in Freiheit gesetzt und durch fraktionierte Destillation getrennt. Diese beiden Verfahren haben die Grundlage der heutigen Eiweißchemie gebildet.

Weitere primäre Spaltungsprodukte als die angeführten anzunehmen, liegt z. Z. kein Anlaß vor, abgesehen von einer Diaminotrioxydodekansäure, die einmal gefunden ist. Der Schwefel ist in den einfachen Eiweißkörpern anscheinend ausschließlich in Form von Cystin enthalten, in den zusammengesetzten Eiweißen noch in anderer Form. Ein Kohlehydrat fehlt den einfachen Eiweißen, unter den zusammengesetzten findet sich eine Gruppe, die Glukosamin enthält.

Während bei der Säurespaltung die Hauptmasse des Eiweißes in reine Bausteine zerfällt, entstehen durch eine Nebenreaktion außerdem braun- oder schwarzgefärbte Stoffe, die man wegen ihrer Aehnlichkeit mit den dunkeln Stoffen in verwesenden Substanzen als Humine bezeichnet. Wegen ihrer Aehnlichkeit mit den Melaninen, den schwarzen oder braunen Pigmenten der Tiere, werden sie auch als Melanoidine bezeichnet. Sie entstehen nicht nur aus Eiweiß, sondern in noch reicherem Maße aus Kohlehydraten, sind aber dann natürlich stickstofffrei, während die Humine aus Eiweiß 5 bis 8 % N enthalten. Alle Humine zeigen hohen Kohlenstoff- und niederen Wasserstoffgehalt (64 und 5 %). Die Humine sind in Wasser und Säure unlöslich, in Alkalien leicht löslich. Unter den Bausteinen des Eiweißes zeigen die größte Neigung zur Huminbildung das Tryptophan und das Glukosamin, nächst ihnen Tyrosin und Lysin. Die Huminbildung bedingt einen Teil der Unsicherheit der Bestimmung der Aminosäuren.

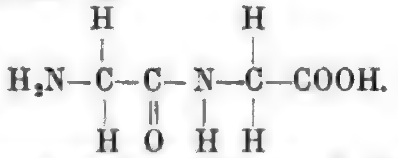
3. Konstitution. Die Eiweißkörper werden durch Kochen mit Säuren und durch die Einwirkung bestimmter Fermente in die bisher geschilderten Spaltungsprodukte zerlegt, die bis auf Harnstoff und Ammoniak alle α-Aminosäuren sind, also die Gruppe



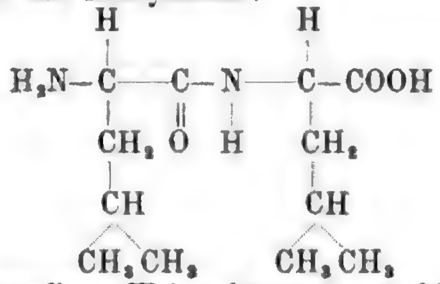
enthalten. Derartige Aminosäuren sind zuerst von Curtius, später von Schiff miteinander vereinigt worden. Die Aufklärung der Konstitution der Eiweißkörper erfolgte aber erst durch die Darstellung der Peptide durch Emil Fischer. In den Peptiden sind die Aminosäuren als Säureamide so miteinander vereinigt, daß das entstehende Peptid selbst wieder eine Aminosäure ist. Das einfachste Peptid besteht aus 2 Molekülen Glykokoll oder Glycin und entsteht nach der Formel:

$$NH_2CH_2COOH + NH_2CH_2COOH - H_2O = NH_2CH_2CONHCH_2COOH.$$

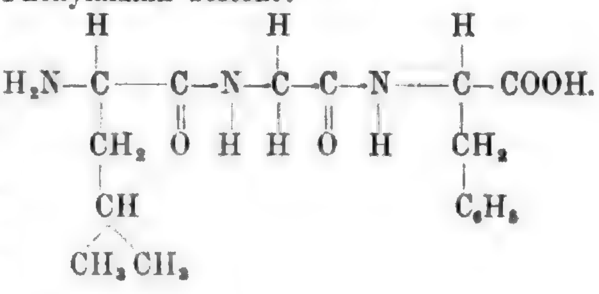
Man schreibt es:



Entsprechend entsteht aus 2 Molekülen Leucin das Leucylleucin:



In derselben Weise können verschiedene Aminosäuren Peptide bilden. Da die gebildeten Dipeptide ihrerseits die anlagerungsfähigen Gruppen der Aminosäuren besitzen, und den α-Aminosäuren, wie E. Fischer gefunden hat, in hervorragendem Maße die Fähigkeit zukommt, lange Ketten zu bilden, so entstehen Tripeptide etwa vom Typus des Leucylglycylphenylamins, das aus je 1 Molekül Leucin, Glykokoll und Phenylalanin besteht:



Die Synthese solcher Polypeptide ist bisher bis zu einer 18gliedrigen Kette, einem Oktadekapeptid aus 3 Molekülen l-Leucin und 15 Molekülen Glykokoll, fortgeschritten; neben den Monoaminosäuren sind auch die Eiweißbasen in die Synthese einbezogen worden; neben den erst verwendeten racemischen sind später meist die optisch aktiven Aminosäuren zum Aufbau der Peptide benutzt worden; ebenso sind Amide der Aminosäuren und Peptide dargestellt.

Mit dem Aufbau der Peptide ist die Frage nach der Struktur des Eiweißes im Prinzip gelöst; denn die Peptide stimmen mit den Eiweißkörpern in ihren wesentlichen chemischen Eigenschaften überein. Die komplizierten Polypeptide stehen in bezug auf Löslichkeit, Fällbarkeit und andere Eigenschaften den natürlichen Peptonen sehr nahe; ja einige werden wie Albumosen ausgesalzen. Bei dem kombinierten Abbau von Eiweiß durch Salzsäure, Trypsin und Alkali gelangten E. Fischer und andere zu Peptiden, die sich mit synthetischen Peptiden als identisch erwiesen.

Daß diese Struktur nicht ausreicht, davon wird unten noch die Rede sein. Vor allem sind die natürlichen kolloidalen Eiweißkörper zweifellos noch viel komplizierter gebaut als selbst das Oktadekapeptid mit dem Molekulargewicht 1213, obwohl dies schon eines der höchsten Molekulargewichte bei einem bekannten Körper ist. Aber die Peptone, die aus diesen kolloidalen Eiweißkörpern entstehen, sind im wesentlichen Polypeptide.

Durch die Peptidstruktur werden folgende Eigenschaften der Eiweißkörper erklärt:

1. Die Tatsache, daß die Eiweißkörper aus so sehr differenten Spaltungsprodukten sich aufbauen und doch alle in ihren Eigenschaften außerordentlich gleichartig sind.

Auch wird hierdurch verständlich, daß die Spaltung der Eiweißkörper durch die verschiedensten Reagenzien so sehr gleichmäßig verläuft und nicht bald da, bald dort, sondern immer an dem präformierten locus minoris resistentiae angreift. Im Gegensatz zu den Kohlehydratfermenten, die für die einzelnen Polysaccharide spezifisch sind, werden alle Eiweißkörper von den gleichen Fermenten gespalten.

2. Die Biuretreaktion. Sie ist eine Rotfärbung, die das Biuret und entsprechend gebaute Körper beim Zusatz von Natronlauge und wenig Kupfersulfat geben. Sie wird von allen Verbindungen gegeben, welche zwei —$CONH_2$-Gruppen an einem Kohlenstoff- oder an einem Stickstoffatom oder direkt miteinander vereinigt besitzen. Im Eiweiß liegt hiervon die Kombination

—CHNH—
|
CONH—

vor. Diese Reaktion wird von den meisten Peptonen und ebenso von vielen synthetisch aufgebauten Peptiden gegeben. Ganz klar ist bisher nicht, nach welchen Regeln bei den synthetischen Peptiden die Biuretreaktion auftritt oder fehlt, und ebensowenig ist klar, weshalb die Biuretreaktion bei gewissen Peptonen, die sich sonst nicht von anderen Peptonen unterscheiden, fehlt, weshalb manche Peptide und Eiweißkörper eine rote, andere eine viel undeutlichere violette Reaktion geben.

3. Das Verhalten zu den Eiweißfermenten. Durch die Fermente vom Typus des Trypsins und Erepsins werden die Eiweißkörper und die Di- und Polypeptide in Aminosäuren zerlegt, aber keine anderen Körper angegriffen (siehe unten).

4. Der gleichzeitig saure und basische Charakter der Eiweißkörper. Wie bei den Eiweißsalzen eingehend auseinandergesetzt werden wird, ist das Eiweiß an sich in wässeriger Lösung nahezu neutral, kann aber mit Säuren und Basen Salze bilden. Geradeso verhalten sich bis in alle Einzelheiten hinein die Aminosäuren, die das Eiweiß aufbauen. Nun ist aber die oben geschilderte Verknüpfung, bei der die Aminogruppe der einen mit der Carboxylgruppe der anderen in Verbindung tritt, die einzige, durch die der Doppelcharakter der Aminosäuren gewahrt bleibt.

Das Glycylglycin

$$H_2NCH_2CONHCH_2COOH$$

und das Diglycylglycin

$$H_2NCH_2CONHCH_2CONHCH_2COOH$$

sind ebensogut Aminosäuren wie das Glykokoll selbst. Fände die Verknüpfung nur durch die Aminogruppen statt, so würden die freien Carboxyle das Eiweiß zur Säure machen, umgekehrt würden Verknüpfungen zweier Carboxylgruppen die Eiweißkörper zu Basen machen.

Der sogenannte Amidstickstoff der Eiweißkörper ist offenbar in derselben Weise gebunden, wie die Aminosäuren aneinander. Er wird durch siedende Säuren, Trypsin und Erepsin abgespalten. Emil Fischer und andere Autoren haben neben den Peptiden auch deren Amide dargestellt, die ebenfalls durch die Eiweißfermente gespalten werden

Argininbindung. Während in den bisher geschilderten Peptiden ein Stickstoffatom zwei Kohlenstoffatome miteinander verknüpft, an deren einem ein Sauerstoffatom steht, also

—C—N—C—
‖ | |
O H H

sind im Arginin durch ein Stickstoffatom zwei Kohlenstoffatome miteinander verknüpft, deren keines mit Sauerstoff verbunden ist.

$$\begin{array}{ccccc} -\mathrm{C} & - & \mathrm{N} & - & \mathrm{C}- \\ \dot{\mathrm{H}} & & \dot{\mathrm{H}} & & \dot{\mathrm{H}} \end{array}$$

Auf diese Art werden Ornithin und Harnstoff oder Guanidin und Aminovaleriansäure zum Arginin vereinigt. Diese Bindung wird von siedenden Säuren und den Fermenten vom Typus des Trypsins und Erepsins nicht angegriffen, dagegen durch siedende Alkalien und das Ferment Arginase, wobei Ornithin und Harnstoff entstehen. Der Guanidin- oder Harnstoffrest ist endständig, d. h. das Arginin ist nicht anders eingefügt als die einfachsten Aminosäuren.

Diese zweite Bindung ist in der überwiegenden Mehrzahl der Eiweißkörper viel seltener enthalten als die Peptidbindung. Da aber alle heute bekannten Eiweißkörper Arginin enthalten, ist sie ebenfalls charakteristisch für das Eiweißmolekül. In den Histonen, wichtigen Eiweißkörpern vorwiegend der Zellkerne, ist der vierte Teil des Stickstoffs in der Form von Arginin enthalten. Noch höher ist der Argininggehalt in manchen Protaminen und in den Protaminen Salmin, Clupein und Scombrin sind $^8/_9$ des Stickstoffs Arginin, d. h. etwa $^2/_3$ Guanidin. In ihnen — sie sind die einzigen ganz aufgelösten Eiweiße — kommt auf je 2 Moleküle Arginin nur je 1 Molekül einer Monoaminosäure, d. h. es müssen in ihnen 2 Moleküle Arginin miteinander verbunden sein; sie enthalten Diarginidkomplexe und die Untersuchung der Protone, der peptonartigen Spaltungsprodukte dieser Protamine, hat ergeben, daß die Anordnung der Bausteine im Molekül eine symmetrische ist, d. h. daß die Aminosäuren zuerst zu Diarginylvalin, Diarginylprolin usw. zusammengefügt und erst diese zum Protamin vereinigt sind. Bei diesen Protaminen wird durch Arginase und durch Alkaliwirkung ein Teil des Harnstoffs, zweifellos dem endständigen Arginin entsprechend, abgespalten, während die Peptidbindungen des übrigen Moleküls erhalten bleiben. Bei den anderen, argininärmeren Eiweißkörpern ist das indessen, wenigstens durch Alkali, nicht oder in viel kleinerem Maße der Fall. — Salpetrige Säure spaltet aus dem Lysin Stickstoff ab. Solche Umwandlungsprodukte von Eiweißkörpern, die durch Alkali oder salpetrige Säure ihrer endständigen Harnstoff- oder Aminogruppen zum Teil beraubt sind, sind unter den Namen Desamidopepton, Desamidoalbumin usw. beschrieben worden.

Anordnung der Bausteine im Eiweißmolekül. Die Art, wie die primären Spaltungsprodukte miteinander verbunden sind, ist bisher besprochen. Weiterhin sind folgende Tatsachen bekannt:

Wie Kossel und Weiß gefunden haben, werden die Spaltungsprodukte des Eiweißes durch Alkalien sehr viel leichter racemisiert, wenn sie im Eiweiß gebunden, als wenn sie frei sind. Am leichtesten wird dabei das Ornithin racemisiert. Diese Racemisierung beruht auf der Bildung einer Enolform, bei der das Kohlenstoffatom der Gruppe CH seine symmetrische Beschaffenheit verliert.

Ferner erfolgt die Abspaltung der Aminosäuren verschieden leicht (Anti- und Hemigruppe).

Seit Schützenberger und Kühne weiß man, daß das Eiweißmolekül gegen die spaltende Wirkung von Säuren oder Fermenten verschieden resistent ist, und es hat sich späterhin herausgestellt, daß der leicht spaltbare Anteil durch seinen Gehalt an Tyrosin und Tryptophan, der schwer spaltbare durch Phenylalanin, Glykokoll und Prolin charakterisiert ist. Die anderen Aminosäuren gehören beiden Teilen an. Dieser Unterschied in den Bausteinen und die verschiedene Festigkeit der Verknüpfung gehn stets Hand in Hand.

Früher nahm man meist an, daß das Eiweiß sich aus mehreren koordinierten Teilen von verschiedener Spaltbarkeit zusammensetze. Die einleuchtendere, heute meist akzeptierte Auffassung ist, daß der Abbau durch Säuren und Fermente allmählich erfolgt. Während die „äußeren" Aminosäuren schon abgespalten sind, bleibt ein Kern enthalten, der immer noch Eiweiß ist. Jedenfalls ist die Erscheinung, daß ein Teil des Eiweißes sehr rasch gespalten wird, daß dann aber Körper zurückbleiben, die nach Reaktionen und Eigenschaften sich scheinbar nicht allzuweit vom Ausgangsmaterial entfernen, und noch den chemischen Charakter der Eiweißkörper bewahrt haben, bei allen Eiweißspaltungen zu beobachten und praktisch und technisch wichtig.

Einen dritten Hinweis auf die besondere Art der Anordnung der Bausteine im Eiweißmolekül bietet die Pepsinverdauung. Durch Pepsin wird nämlich das Eiweiß in Peptone verwandelt, diese aber nicht in Aminosäuren zerlegt (s. unten). Dabei sind die schließlich entstehenden Körper, die Peptone, zum großen Teil wahrscheinlein gar nicht besonders hochmolekulare Körper, sondern mit den künstlichen Peptiden auf eine Stufe zu stellen, vielleicht entstehen selbst schon Dipeptide durch das Pepsin, dagegen niemals Aminosäuren. Auch wird das Brechungsvermögen einer Eiweißlösung, eine physikalische Konstante, die molekulare Aenderungen sehr genau zu

Digitized by Google

erkennen gestattet, durch die Pepsinverdauung gar nicht beeinflußt, während die Zerlegung der Peptone in Aminosäuren eine starke Vermehrung des Brechungsvermögens hervorruft. Die einzelnen Pepsinpeptone verhalten sich in der Weise genau wie das ursprüngliche Eiweiß, als durch Säure- oder Trypsinspaltung aus ihnen zunächst einzelne Aminosäuren, darunter Tyrosin und Tryptophan, abgespalten werden, während der Rest zunächst unverändert bleibt. — Der Unterschied der Pepsinspaltung von der völligen Spaltung kann nicht wohl anders gedeutet werden, als daß die Peptone in irgendwie anderer Weise zum Eiweißmolekül zusammengefügt sind, als die Aminosäuren zu den Peptonen oder Peptiden.

Andere Atomgruppierungen als die im vorigen Kapitel aufgeführten Aminosäuren und die durch ihre Verknüpfung entstehenden Gruppierungen fehlen im Eiweiß.

Der Stickstoff ist ausschließlich als NH_2 vorhanden, nicht aber als Nitro-, Nitroso- oder Azostickstoff, was dadurch bewiesen wird, daß für das Eiweiß wie für alle seine Spaltungsprodukte die Bestimmung nach Kjeldahl ziemlich denselben Wert liefert wie die nach Dumas.

Der Kohlenstoff gehört teils der Fettreihe, teils der aromatischen an. Die Einfügung beider ist nicht verschieden. Heterozyklische Gruppen sind das Tryptophan, das Histidin, das Prolin und die Oxy-α-Pyrrolidincarbonsäure. Hydroxylgruppen enthalten von den Spaltungsprodukten das Tyrosin, Serin und die Oxy-α-Pyrollidincarbonsäure. Aldehyd- und Ketongruppen enthält das Eiweiß nicht, ebensowenig die Gruppen $O.CH_3$ und $O.C_2H_5$.

4. Zusammensetzung aus den einzelnen Aminosäuren. Die qualitative Zusammensetzung der Eiweißkörper aus den einzelnen Gruppen schien anfangs eine sehr verschiedene zu sein. Mit der Verbesserung der Darstellungsmethoden haben sich diese Unterschiede aber immer mehr verwischt. Seit Kossel sichere Methoden zur Darstellung des Lysins, Arginins und Histidins angegeben hat, haben sich das Arginin in allen, die beiden anderen in nahezu allen Eiweißkörpern gefunden. E. Fischers Methode für die Monoaminosäuren hat ebenfalls eine große Uebereinstimmung ergeben. Am wenigsten Bausteine (Ornithin, Harnstoff, Alanin, Prolin) enthält das Protamin Scombrin, dann folgt mit fünf Spaltungsprodukten (Ornithin, Harnstoff, Serin, Valin, Prolin) das Protamin Salmin, dann Clupein, Sturin und andere Protamine, die alle kein Cystin und wechselnde, aber immer nur wenige Monoaminosäuren enthalten. Alle übrigen Eiweißkörper enthalten immer die meisten Bausteine mit nur einigen Ausnahmen. So fehlt das Glykokoll dem Casein, Zein, Globin und Serumalbumin, das Tyrosin dem Leim, das Tryptophan dem Leim und dem Zëin, das Lysin dem Zein, Gliadin und anderen alkohollöslichen Pflanzeneiweißen. In einer Anzahl anderer sind einzelne Spaltungsprodukte, auch gut bestimmbare, in so winziger Menge vorhanden, daß man an eine Beimengung anderer Eiweißkörper denken muß. Diese ist schon bei den kristallisierenden Eiweißen oft schwer auszuschließen, noch schwerer aber ist das der Fall bei den Eiweißkörpern der Stützgewebe, die immer in Wasser und Salzlösungen, häufig auch in verdünnten Säuren und Laugen unlöslich sind. Diese werden dann in der Regel so gewonnen, daß die übrigen Eiweißkörper weggelöst werden, und der unlösliche Rückstand das betreffende Gerüsteiweiß darstellt. Dabei muß man dann gewöhnlich zwischen der Gefahr, ungelöste Reste eines anderen Eiweißes mitzubekommen, und der Gefahr, das Gerüsteiweiß zu spalten, durchlavieren, und die Analysen des Leims, Elastins usw. besitzen immer eine gewisse Unsicherheit.

Hauptsächlich aber müssen die Unterschiede der einzelnen Eiweißkörper nicht sowohl auf Verschiedenheiten ihrer Bausteine beruhen, als darauf, daß diese Bausteine in verschiedener Menge und verschiedener Anordnung auftreten. Die Menge ist sehr different, da die meisten Spaltungsprodukte nicht einmal, sondern mehrfach im Eiweißmolekül auftreten. So zeigt ein Vergleich des Histidins mit dem Tyrosin, daß im Globin mindestens 10 Histidinmoleküle vorhanden sein müssen. Legt man das aus den Analysenzahlen berechnete mindeste Molekulargewicht des Hämoglobins von 16 669 zugrunde, so ergeben sich sogar 12 Moleküle Histidin. Entsprechend berechnen sich aus dem Arginingehalt des Zeins 17 Moleküle Glutaminsäure, aus dem Tyrosingehalt des Gliadins 38 Moleküle Glutaminsäure. Das Salmin enthält 10 Moleküle Arginin auf 1 Molekül Valin oder Prolin. Bei der partiellen Spaltung des Eiweißmoleküls finden sich die meisten Aminosäuren sowohl in dem zerlegten Teil als im unangegriffenen Rest, müssen also an verschiedener Stelle des Moleküls oder in verschiedener Bindung vorhanden sein.

Es ist wohl möglich, daß die durch die letzte Beobachtung wahrscheinlich gemachte verschiedene Anordnung der Aminosäuren im Molekül auch eine Rolle spielt, bisher ist nur die Gesamtmenge der auf die einzelnen Eiweiße kommenden Aminosäurenmenge bestimmt worden, und es hat sich dabei gezeigt, daß jedem Eiweiß eine ganz bestimmte und konstante Zusammensetzung aus Aminosäuren zukommt, die es von jedem anderen Eiweiß unterscheidet. Diese Zusammenset-

Digitized by Google

zung ist daher die gegebene Grundlage für die Einteilung der Eiweißkörper, und es hat sich ergeben, daß den älteren Gruppierungen, die sich auf den physikalischen Eigenschaften, der Löslichkeit usw. der natürlichen Eiweißkörper aufbauten, auch Uebereinstimmungen in der Zusammensetzung aus den Aminosäuren entsprechen. Im speziellen Teil werden bei jeder Gruppe die für sie charakteristischen Mengen der Bausteine angegeben werden. Die folgende Tabelle enthält die Zusammensetzung weitgehend aufgelöster und besonders typischer Eiweißkörper. Ornithin und Harnstoff sind zusammen als Arginin aufgeführt. Die Zahlen beziehen sich auf 100 g Eiweiß, am Schluß ist in Prozenten angegeben, wieviel von den Bausteinen bekannt ist:

	Serumalbumin Pferd	Fibrin	Myosin Rind	Edestin Hanf	Excelsin Paranuß	Legumin Erbse	Glutenin Weizen	Gliadin Weizen	Hordein Gerste	Zein Mais	Histon Thymus	Clupein Hering
Glykokoll . . .	0	3,0	0,5	3,8	0,6	0,38	0,89	0	0	0	0,5	0
Alanin	4,19	3,6	4,0	3,6	2,33	2,08	4,65	2,0	1,34	9,79	3,46	3
Valin		1,0	0,9	6,2	1,51		0,24	0,21	1,40	8,98		6
Leucin	30[1])	15,0	7,8	14,5	8,7	8,0	5,95	5,61	7,0	19,55	11,8	0
Isoleucin[2]) . .												
Asparaginsäure.	4,43	2,0	0,5	4,5	3,85	5,30	0,91	0,58	1,32	1,73		0
Glutaminsäure.	7,7	10,4	13,6	14,5	12,94	16,97	23,42	37,33	43,20	26,17	3,66	0
Prolin.	2,34	3,6	3,3	1,7	3,65	3,22	4,23	7,06	13,73	9,04	1,46	11
Oxyprolin . .	1,04											
Phenylalanin .	4,24	2,5	2,5	2,4	3,55	3,75	1,97	2,35	5,03	6,55	2,2	0
Tyrosin . . .	2,1	3,82	2,2	2,1	3,03	1,55	4,25	1,20	1,67	3,55	6,31	0
Tryptophan . .		+[3])	+	+	+	+	+			0	+	0
Histidin		+	2,66	2,19	1,47	1,69	1,76	0,58	1,28	0,82	1,21	0
Arginin		3,0	5,06	14,17	14,20	11,73	4,72	3,16	2,16	1,55	14,36	87
Lysin		4,0	3,26	1,65	1,64	4,98	1,92	0	0	0	7,7	0
Serin	0,56	0,8										
Cystin	2,53	1,17	+									0
Ammoniak . .	0,95	vorh.	1,47	2,28	1,80	2,05	4,01	5,11	4,87	3,64	1,66	0
Summe	60	55	49	74	60	62	59	66	83	92	55	100

[1]) Wahrscheinlich Summe von Valin, Leucin und Isoleucin. [2]) Isoleucin ist selten bestimmt, [3]) + bedeutet vorhanden,

Vollständig aufgelöst sind demnach nur 2 Protamine, bei allen anderen fehlt der vierte Teil und mehr, da bei der Aufspaltung der Eiweißkörper ja Wasser eintritt, und somit die Summe der Aminosäuren 100% übersteigen müßte. Doch hat man allen Grund anzunehmen, daß das Defizit nur darauf beruht, daß die Estermethode, wenigstens wenn man alle Aminosäuren gleichzeitig bestimmen will, nur Minimalwerte liefert. Bei den Eiweißkörpern der Pflanzensamen, die von den komplizierten Eiweißkörpern am sorgfältigsten untersucht sind, fehlt nicht mehr allzuviel zur vollständigen Auflösung.

Die physikalischen Eigenschaften der einzelnen Eiweißkörper lassen sich aus ihrem Aufbau aus Aminosäuren bisher nicht erklären, es läßt sich nur feststellen, daß das Fibroin der Seide und der ihm nahestehende charakteristische Eiweißkörper der Spinnenfäden auffallend reich an Glykokoll und Alanin sind, die Hornsubstanzen viel Tyrosin und besonders Cystin enthalten, die Eiweiße der Getreidearten 1. alkohollöslich sind und 2. kein Lysin enthalten usw.

Die Frage, ob die entsprechenden Eiweißkörper bei verschiedenen Tieren und Pflanzen identisch sind oder nicht, ist bisher nur bei einzelnen Gruppen von Eiweißkörpern systematisch untersucht worden.

Osborne hat bei den Eiweißkörpern der Pflanzensamen festgestellt, daß Pflanzen, die morphologisch keine Aehnlichkeit besitzen, auch ganz verschiedene Eiweißkörper als Reservestoffe für den wachsenden Embryo in ihren Samen angehäuft haben. Nahe verwandte Pflanzen haben dagegen auch Sameneiweiße, die sich außerordentlich nahe stehen, und nur unbedeutende, häufig schwer feststellbare Differenzen in der Zusammensetzung zeigen. Ganz identisch scheinen die Sameneiweiße indessen bei zwei verschiedenen Arten, selbst einer Gattung, nie zu sein, die Zusammensetzung des Sameneiweißes ist daher so gut Artmerkmal wie die anatomischen Unterschiede.

Eine Anzahl von Fischen enthält in ihren Spermatozoen charakteristische, stark basische Eiweißkörper, die Protamine, und die Untersuchungen Kossels haben gelehrt, daß jede der bisher untersuchten Arten ihr eigenes Protamin besitzt. Beziehungen

Digitized by Google

zwischen Aehnlichkeit der Protamine und Verwandtschaft der Arten im System liegen nicht vor.

Abderhalden hat die Aminosäuren der Fibroine verschiedener Seidensorten bestimmt, und ebenfalls unverkennbare Unterschiede gefunden. Ebenso sind die Keratine der Haare verschiedener Tiere erheblich verschieden. Menschliche Haare haben einen fast doppelt so hohen Schwefel- und Cystingehalt als die von Pferden oder Schafen.

Kobert und Reichert und Brown haben die Kristallformen der Hämoglobine einer großen Anzahl verschiedener Tierarten untersucht, und dieselben immer oder fast immer deutlich unterschieden gefunden, wobei freilich nicht gesagt ist, daß diese Unterschiede unbedingt auf chemischen

Salmin Lachs	Sturin Stör	Leim	Horn Rind	Haare Pferd	Elastin Nackenband	Fibroin Cantonseide	Seidenleim Cantonseide	Casein Kuhmilch	Casein Frauenmilch	Vitellin Hühnerei	Globin	
0	0	19,25	0,34	4,7	25,75	37,5	1,2	0	0	0	0	Glykokol
0	+	3,0	1,2	1,5	6,58	23,5	9,2	0,9	1,2	0,75	4,19	Alanin
4,3	0		5,7	0,9	1,0			6,69		1,87		Valin
0	+	6,75	18,3	7,1	21,38	1,5	5,0	7,92	8,8	9,87	29,04[1])	Leucin
								1,43				Isoleucin
0	0	0,56	2,5	0,3		0,75	2,5	1,2	1,0	2,13	4,43	Asparaginsäure
0	0	14,0	14,0	viel	0,76	0	2,0	10,77	10,95	12,95	1,73	Glutaminsäure
11		7,7	3,6	3,4	1,74	1,0	2,5	6,7		4,18	2,34	Prolin
		6,4						0,23			1,04	Oxyprolin
0	0	viel	3,0	+	3,89	1,6	0,6	3,5	2,8	2,54	4,24	Phenylalanin
0	0	0	4,58	3,2	0,34	9,8	2,3	4,5	4,71	3,37	1,33	Tyrosin
0	0	0			0			2,0		+	+	Tryptophan
0	12,9	0,4	+	0,61	0,53			2,6		1,90	10,96	Histidin
87	61,8	9,3	2,25	4,45	1,86		+	4,8		7,46	5,42	Arginin
0	12,0	5—6	+	1,12	2,48			5,8		4,81	4,28	Lysin
7,8		0,4	0,7	0,6		1,5	5,8	0,43			0,56	Serin
0	0	0?	6,8	7,98	0?			+			0,31	Cystin
0	0	0 43			0,05	Spur	1,5	1,8		1,25	0,93	Ammoniak
100	100	74	64	36	65	78	32	62		54	71	

die unter Leucin angegebenen Zahlen beziehen sich auf die Summe von Leucin und Isoleucin.
nicht quantitativ bestimmt.

Unterschieden der Hämoglobine selbst beruhen müssen, da die Blutkörperchen und das aus ihnen sich zunächst abscheidende Hämoglobin noch andere Stoffe enthalten.

Für das Blutserum gestattet die biologische Reaktion, sichere Unterschiede zwischen allen Arten zu machen, wobei wiederum nahe verwandte Arten ähnliche Reaktionen geben, entfernt stehende nichts Gemeinsames haben. Freilich ist nicht sicher, wieweit die Reaktion auf den Eiweißkörpern beruht. Selbst bei sehr wirksamem Präzipitin wird nur ein sehr kleiner Teil, weit unter 1 % des reagierenden Eiweiß, gefällt, und chemisch sind Serumeiweiß und Milch- oder Eiereiweiß einer Art jedenfalls verschiedener, als die durch die biologische Reaktion zu unterscheidenden zwei Serumeiweiße. Die Präzipitinreaktion erlaubt somit kein sicheres Urteil, ob die Spezifizität der Art bereits bei dem chemischen Bau der Eiweißkörper beginnt.

Noch weniger ist über die Organeiweiße bekannt. Nur in einzelnen Organen, wie den Muskeln oder dem Fischsperma, sind spezifische Eiweiße gefunden worden. Sonst wissen wir, daß wir aus dem Protoplasma aller drüsigen Organe Proteide und Globuline isolieren können; aber wir wissen nicht, ob bereits an diesen Körpern die Spezifizität der Organe haftet, ob die einzelnen chemischen Individuen die Funktion der Organe bedingen, oder ob nicht vielmehr aus gleichen chemischen Körpern das Protoplasma sich in jeweils besonderer Art und Weise aufbaut. — Mehr charakteristische Eigenschaften zeigen die Eiweißkörper der Gerüstsubstanzen, die also kein Teil des Protoplasmas, indessen von ihm gebildet sind. Die Kollagene, Keratine, Fibroine, Elastin, Amyloid und Konchiolin sind ganz typisch gebaute Körper, deren Artspezifizität bei Keratin und Fibroin feststeht, beim Kollagen wahrscheinlich ist.

5. **Fermente.** Eiweißspaltende Fermente sind unter den lebenden Wesen außerordentlich weit verbreitet, ja wahrscheinlich produzieren alle Organismen und vielleicht alle Zellen derartige Fermente.

Folgende Fermente sind genauer untersucht:

1. Pepsin. Es wirkt nur in Gegenwart

Digitized by Google

von H-Ionen, am besten zusammen mit einer etwa $^{n}/_{10}$-Salzsäure. Es greift alle natürlichen einfachen und zusammengesetzten Eiweiße an, wenn auch manche Gerüsteiweiße, wie besonders das Keratin, sehr schwer, in dicker Schicht praktisch kaum löslich sind; nicht angegriffen werden die Protamine. Ungelöste und gelöste Eiweißkörper werden zunächst wenigstens zum größten Teil in sogenanntes „Acidalbumin" verwandelt und dann in Albumosen und Peptone gespalten; auch hier ist die Spaltung des Eiweißes eine allmähliche, es treten Peptone und Acidalbumin nebeneinander auf. Es scheint, daß die Wirkung des Pepsins sich in der Art und Reihenfolge der Spaltungsprodukte nicht von einer Eiweißspaltung unterscheidet, die durch n-Salzsäure oder schwächere in der Siedehitze vor sich geht, daß das Pepsin also die Wirkung der H-Ionen nur katalytisch beschleunigt. Dagegen unterscheidet sich die Pepsinspaltung in Gegenwart schwacher Säuren dadurch von der Spaltung durch starke Säuren, daß sie nicht über die Peptonstufe hinausgeht, und daß keine Aminosäuren gebildet werden. Diese Tatsache ist von Kühne gefunden und seitdem immer wieder bestätigt worden. Die bei monatelang fortgesetzten Versuchen bisweilen in Spuren gefundenen Aminosäuren entstehen durch Säure-, nicht durch Fermentwirkung. Die künstlichen Peptide werden von Pepsin alle nicht angegriffen.

Bei bestimmten geronnenen Eiweißkörpern, dem Myosin und besonders dem Fibrin, ist es für die Pepsinwirkung erforderlich, daß die Eiweißkörper in Säuren quellen, und alle Substanzen, die diese Quellung verhindern, stören die Pepsinwirkung. Doch dürfen derartige, am Fibrin gemachte Beobachtungen nicht verallgemeinert werden.

Die Widerstandsfähigkeit der Eiweißkörper gegen Pepsin ist verschieden; so wird das Serumalbumin leichter als das Eieralbumin gespalten, am schwersten das Serumglobulin. Die Verdaulichkeit des Eiweißes wird durch trockenes Erhitzen, ja schon durch Kochen von im Wasser suspendiertem Eiweiß sehr erheblich vermindert.

Das Pepsin wird von bestimmten Drüsen der Magenschleimhaut der Wirbeltiere sezerniert. Eiweißlösende Fermente, die am besten oder ausschließlich bei saurer Reaktion wirken, sind bei Wirbellosen und Einzelligen mehrfach beschrieben, aber nicht hinreichend studiert, um ihre Beziehungen zum Pepsin feststellen zu können. Die Pepsine der verschiedenen Wirbeltiere zeigen keine Differenzen, die berechtigen würden, ihre Identität zu bezweifeln.

2. Trypsin. Es löst Eiweiß am besten bei der Reaktion einer verdünnten Bikarbonatlösung, ist aber von der Reaktion wenig abhängig. Es löst die große Mehrzahl der natürlichen Eiweißkörper auf: Eine Ausnahme ist die Muttersubstanz des Glutins, das sogenannte Kollagen, andere Gerüsteiweiße, wie das Keratin, werden wenigstens sehr schwer angegriffen, und sind in einigermaßen dicker Schicht praktisch unverdaulich. Eine zweite Ausnahme sind die Albumine, das Eier- und besonders das Serumalbumin, solange sie sich in kolloidalem Zustande befinden. Sie binden das Trypsin zwar wie andere Eiweißkörper, werden aber nicht oder so gut wie nicht gelöst und hindern dadurch die Trypsinwirkung auf andere Eiweißkörper. Gekochtes oder mit Säure behandeltes Albumin ist nicht schwer verdaulich.

Das Trypsin bildet zunächst Peptone, zerlegt aber allmählich einen großen Teil in Aminosäuren. Ob alle Aminosäuren zunächst in Form von Pepton aus dem Eiweiß hervorgehen oder die leichtest abspaltbaren, wie das Tyrosi, ndirekt abgespalten werden, ist ungewiß. Die schwer spaltbaren Peptone nennt man Antipeptone, der gar nicht angreifbare Rest gibt keine Biuretreaktion. Seine Menge ist bei den einzelnen Eiweißkörpern verschieden, beim Casein höchstens 15 %, beim Edestin fast die Hälfte, beides nur nach wochenlang fortgesetzter Verdauung. Nach kürzerer Verdauung findet man erhebliche Mengen Pepton. Die Trypsinverdauung geht etwas weiter, wenn die Eiweißkörper erst mit Pepsin peptonisiert, dann erst mit Trypsin gespalten werden, beim Casein vermindert sich die übrigbleibende Peptonmenge auf etwa 8 %. Aus den Pepsinpeptonen werden Tyrosin und Tryptophan ganz, andere Aminosäuren zum Teil durch Trypsin abgespalten.

Der Nachweis, daß das Trypsin einen Teil des Eiweißes unangegriffen läßt, und wie groß der Anteil ist, wird am sichersten durch die Darstellung des unverdauten Restes geliefert. Außerdem aber existiert eine besondere Methode, die Formoltitrierung von Sörensen, die den Spaltungsgrad der Eiweißkörper zu erkennen gestattet. Das Prinzip der Methode beruht darauf, daß Aminosäuren, Peptone und Eiweißkörper neutrale Körper sind, daß sie aber durch Hinzufügung des ebenfalls neutralen Formaldehyds in die Methylenverbindungen überführt werden, die Säuren sind.

$$\begin{matrix} CH_3 \\ \dot{H}CNH_2 \\ \dot{C}OOH \end{matrix} + H_2CO = \begin{matrix} CH_3 \\ H\dot{C}N{:}CH_2 \\ \dot{C}OOH \end{matrix} + H_2O.$$

Man neutralisiert die zu untersuchende Lösung genau mit Lackmus, behandelt sie mit Formol, und titriert sie dann mit Phenol-

phthalein bis zur starken Rotfärbung. Die Menge des zu dieser Titration verbrauchten Alkalis ist ein Maß für die Menge der freien NH_2-Gruppen, die mit Formol reagieren können. Da auch Ammoniak reagiert, muß es anderweit bestimmt und abgezogen werden. Wenn man nun ein Eiweiß mit Trypsin verdaut, das Verdauungsgemisch der Formoltitration unterwirft, es nachher durch siedende Säuren spaltet und es nun von neuem formoltitriert, so erhält man einen höheren Wert als Beweis dafür, daß neue NH_2-Gruppen frei geworden sind. Nach dieser Methode gemessen, bleiben von Wittepepton und von Casein auch nach einer Trypsinverdauung von 14 und 25 Tagen reichlich 40 % der Peptidbindungen ungelöst. In anderen Reihen blieben in einem Tage etwa 60, in 6 Tagen um 50 % unangegriffen. Andererseits kann die Formoltitrierung dazu benutzt werden, um das Vorhandensein eines Ferments zu beweisen, das über die Peptonstufe hinaus Peptidbindungen löst.

Von den künstlichen Peptiden wird durch Trypsin ein Teil gespalten. Der Angriff des Ferments auf Racemkörper erfolgt asymmetrisch, und Dipeptide, in denen eine oder beide Komponenten die optischen Antipoden der natürlichen Aminosäuren sind, werden überhaupt nicht angegriffen. Außerdem werden aber noch eine Reihe Peptide, die aus den natürlichen Aminosäuren bestehen, nicht angegriffen. Der Grund ist so wenig klar, wie die Differenz zwischen Hemi- und Antigruppe bei den natürlichen Eiweißkörpern. Die Racemisierung der natürlichen Eiweißkörper durch Alkali vernichtet oder vermindert auch ihre Verdaulichkeit durch Trypsin.

Das Trypsin löst nur die Peptidbindung, wirkt aber auf andere Stoffe, auch chemisch ähnliche, z. B. die Hippursäure, nicht ein.

$C_6H_5—CO—NH—CH_2—COOH$ Hippursäure,

$NH_2—CH_2—CO—NH—CH_2—COOH$ Glycylglycin.

Das Trypsin wird von der Pankreasdrüse der Wirbeltiere sezerniert, und durch die von der Darmschleimhaut sezernierte Enterokinase aktiviert.

Trypsinähnliche Fermente, die vielleicht mit dem Trypsin identisch sind, sind unter den Wirbellosen sehr weit verbreitet, z. B. in der Mitteldarmdrüse der Cephalopoden, bei Echinodermen usw. Auch in Pflanzen kommen derartige Fermente vor, z. B. das **Papayotin**, das Aminosäuren frei macht, daneben aber Peptone bestehen läßt, anscheinend mehr als das Trypsin. Papayotin soll bei 80° ein Optimum haben.

3. Erepsin. Es wirkt am besten bei neutraler oder der Reaktion einer verdünnten Bikarbonatlösung, ist aber wenig von der Reaktion abhängig.

Es wirkt auf die kolloidalen oder Eiweißkörper im engeren Sinne gar nicht ein, die Histone und das Casein werden von ihm gespalten, aber langsam und unvollkommen; die verschiedenen Albumosen und die Peptone werden von Erepsin weitgehend gespalten, ob ganz vollständig ist nicht genau bekannt. Vollständig und sehr schnell werden die Pepsinpeptone zerlegt, so daß die Spaltung erst durch Pepsin und dann durch Erepsin so vollständig ist wie die durch siedende Säuren.

Das Erepsin spaltet auch alle untersuchten künstlichen Peptide. Der Angriff erfolgt asymmetrisch. Hippursäure spaltet es nicht.

Das Erepsin ist zuerst im Extrakt der Darmschleimhaut und im Darmsaft der Säugetiere aufgefunden, aber auch im Darm aller untersuchten Wirbeltiere enthalten. Ferner findet es sich in größerer oder geringerer Menge in den Formelementen des Blutes, und in allen oder fast allen untersuchten Organen, und zwar auch wenn sie von Blutbestandteilen frei sind.

Die Fermente der verschiedenen Organe voneinander zu unterscheiden, liegt bisher kein Grund vor; sie werden, da sie Peptone und Peptide spalten, Eiweiß aber nicht, auch als „peptolytische Fermente" bezeichnet. Ein peptolytisches Ferment der Magenschleimhaut spaltet Peptone bei schwach saurer Reaktion, nicht aber bei Gegenwart von freier Salzsäure in Aminosäuren. Die Gegenwart dieses Erepsins in Magenschleimhautextrakten, z. B. vielen käuflichen Pepsinen, hat schon viel Verwirrung hervorgerufen.

Nachgewiesen wird das Erepsin durch Verschwinden der Biuretreaktion in Pepsinpeptonen oder durch das Freiwerden von Tryptophan und das Auftreten der Tryptophanreaktion in Peptonen und Peptiden oder das Ausfallen von Tyrosin bei Verwendung tyrosinhaltiger Peptone und Peptide oder die Verminderung der Drehung bei Verwendung von Peptonen, die selbst stark drehen, während die Spaltungsprodukte nur schwach drehend sind, endlich auch durch die Formoltitrierung.

4. Fermente, die Eiweiß lösen, und es vollständig in Aminosäuren zerlegen, also wie eine Kombination von Trypsin und Erepsin wirken.

Dahin gehört zunächst ein Ferment der Hefe, die **Endotryptase**, die Eiweiß anscheinend vollständig und die künstlichen Peptide so rasch spaltet, daß sie häufig zu Fermentstudien verwendet worden ist. Ferner gehören hierher vielleicht die Fermente der

Digitized by Google

Pflanzensamen, durch die das Reserveeiweiß des Embryos in den Stoffwechsel einbezogen wird. Auch sie bilden große Mengen von Aminosäuren und spalten die künstlichen Peptide. Da sich neben den Aminosäuren in den Samen auch Peptone und vielleicht Peptide finden, ist es aber 1. nicht sicher, ob die Pflanzenfermente das Eiweiß zu Ende spalten, und 2. ist es durchaus möglich, daß sich in den Pflanzen zwei Fermente finden, deren eines dem Pepsin, das andere dem Erepsin analog ist. Auch in anderen Pflanzenteilen als den Samen kommen eiweißspaltende Fermente vor. Aminosäuren bildet auch das Bromelin der Ananas.

Hierher gehören vielleicht auch die autolytischen Fermente der Organe. Wenigstens werden die Organeiweiße von ihnen gelöst, und es treten große Mengen Aminosäuren, dagegen nicht oder nur vorübergehend Peptone auf, auch werden Peptide gespalten. Es ist aber ebensogut möglich, daß es sich hier um Erepsin handelt. Denn bei den autolytischen Versuchen wird zwar das in Lösung gehende Eiweiß ganz abgebaut, aber es geht immer nur ein Teil des Eiweiß in Lösung und dieser könnte einem Eiweiß entsprechen, das wie das Histon von Erepsin langsam angegriffen wird. Es ist für die autolytischen Vorgänge typisch, daß die Auflösung der Eiweißkörper, die eigentliche Autolyse sehr langsam erfolgt, die Spaltung zugesetzten Peptons dagegen sehr schnell.

In den weißen Blutkörperchen und in der Milz sind zwei Fermente vorhanden, die Eiweiß lösen und Aminosäuren bilden, das eine wirkt in saurer, das andere in alkalischer Reaktion. Hedin bezeichnet das in alkalischer Lösung wirksame als Lieno-α-protease, das in saurer Lösung wirkende als Lieno-β-protease. Nach Dakin wirkt auch das Nierenferment bei saurer Reaktion.

Die Fermente der Bakterien lösen Eiweiß, bilden Aminosäuren und spalten Peptide, sind aber noch wenig isoliert. Das Bacterium coli commune enthält nur Erepsin, kein eiweißlösendes Ferment.

5. Arginase. Sie wirkt bei neutraler Reaktion und zerlegt Arginin in Harnstoff und Ornithin, löst also im Gegensatz zu Trypsin und Erepsin die zweite im Eiweiß vorkommende Bindung, wirkt also wie siedende Alkalien. Es ist schon erwähnt worden, daß sie in den Protaminen, nicht aber in den anderen Eiweißkörpern, diese Bindung auch intraprotein spaltet. Die Arginase ist in reichlicher Menge in der Leber enthalten, außerdem in der Dünndarmschleimhaut, der Thymus und den Lymphdrüsen; im Muskel ist sie in geringer Menge vorhanden, im Blute, der Milz, den Nebennieren und der Galle ist sie nicht sicher, im Pankreassaft nicht nachweisbar. In der Hefe ist sie gefunden, in Pflanzensamen nicht.

6. Sekundäre Spaltungsprodukte. Bei allen Spaltungen zerfällt das Eiweißmolekül zunächst in die Aminosäuren, diese werden aber dann durch viele Eingriffe weiter verwandelt, und diese sekundären Umwandlungsprodukte des Eiweißes sind zum Teil biologisch und technisch von allergrößter Bedeutung. Rein erhält man sie nur dann, wenn man einzelne Aminosäuren für sich abbaut. Entstehen sie aus dem Eiweiß, so sind sie nicht nur unter sich, sondern auch mit den primär entstandenen Aminosäuren gemengt.

6a) Die künstliche Zersetzung des Eiweißes durch Chemikalien. α) Die Spaltung des Eiweißes durch siedende Alkalien. Die zunächst gebildeten Aminosäuren sind optisch inaktiv, und an Stelle des Arginins erscheinen Ornithin und Harnstoff. Weiterhin wird aus den Aminosäuren Ammoniak abgespalten, und es finden sich statt und neben den Aminosäuren die betreffenden einfachen Säuren, Essig-, Propion-, Butter- und Valeriansäure, daneben natürlich in großen Mengen Ammoniak. Nebenher gehen noch andere Prozesse, die zum Auftreten von Ameisensäure und Kohlensäure führen. Noch energischer wirkt das Schmelzen der Eiweißkörper mit Kali in Substanz; auch hier treten Fettsäuren auf, aus der Indolaminopropionsäure, dem Tryptophan, wird Indol und Skatol, aus dem Cystin entstehen Schwefelwasserstoff und Merkaptan. Da Skatol, Merkaptan, Schwefelwasserstoff und manche Fettsäuren durch den Geruch leicht nachzuweisen sind, ist das Auftreten bei der Kalischmelze schon früh beobachtet worden, und es wurde die Aehnlichkeit mit der Fäulnis betont, bei der diese Stoffe zum Teil auch auftreten. Doch gilt diese Aehnlichkeit nicht allgemein.

Ganz ähnlich wie das Kochen mit Alkalien scheint überhitzter Wasserstoff zu wirken.

β) Die Oxydation des Eiweißes mit Schwefelsäure und Permanganat oder Bichromat. Hierbei entstehen ebenfalls Fettsäuren, ebenso bei der Oxydation mit Permanganat allein. Das Arginin geht durch Permanganat erst in Guanidinbuttersäure, dann und zwar quantitativ in Guanidin über.

γ) Die Oxydation mit Wasserstoffsuperoxyd. Diese spaltet aus den isolierten Aminosäuren Kohlensäure und Ammoniak ab, und es entstehen die um ein C ärmeren Aldehyde, die dann zum Teil weiter zu den entsprechenden Säuren oxydiert werden. Aus Alanin entstehen so Metaldehyd und Essigsäure, aus Valin Isobutylaldehyd und Buttersäure, usw. Bei der Einwirkung auf

Digitized by Google

das gesamte Eiweiß sind eine Reihe dieser Aldehyde gefunden worden.

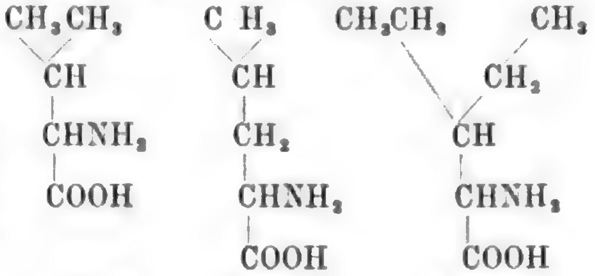
δ) *Die Oxydation mit Salpetersäure.* Es entstehen erhebliche Mengen von Oxalsäure. Aus dem Arginin entstehen Nitroarginin und Nitroguanidin; auch die aromatischen Bausteine werden vermutlich nitriert.

ε) *Das Erhitzen mit Brom unter Druck.* Es entsteht ebenfalls Oxalsäure, daneben bromierte Fettsäuren.

6b) *Die Zersetzung des Eiweiß im Stoffwechsel lebender Wesen, Bakterien, Pflanzen, Tiere.* Im Stoffwechsel der Tiere, Pflanzen und Bakterien wird Eiweiß ab- und aufgebaut. Der Abbau beginnt, soweit wir wissen, ausnahmslos mit der Spaltung des Eiweißes durch Fermente in Aminosäuren. Die Aminosäuren aber werden dann vielfach weiter verwandelt, und das Studium dieser sekundären Umwandlungsprodukte ist eins der wichtigsten Gebiete der physiologischen Chemie. Für diese sekundären Umwandlungsprodukte der Aminosäuren schlagen *Ackermann* und *Kutscher* neuerdings den Namen „Aporrhegmen" vor, der sich indessen noch nicht eingebürgert hat. Ihre Bildung durch Fermente wird vielfach angenommen, es ist aber bis heute kein Fall bekannt, in dem die Umwandlung der Aminosäuren in Lösung nach Aufhebung der Struktur und des Lebens der Zelle noch vor sich ginge. Das Studium der sekundären Umwandlungsprodukte ist bei der Hefe und anderen Bakterien relativ einfach, weil hier die gebildeten Körper meist keine weitere Verwertung finden, bei den höheren Tieren, bei denen der Eiweißkohlenstoff Energiequelle ist, außerordentlich schwierig und oft nur auf Umwegen möglich.

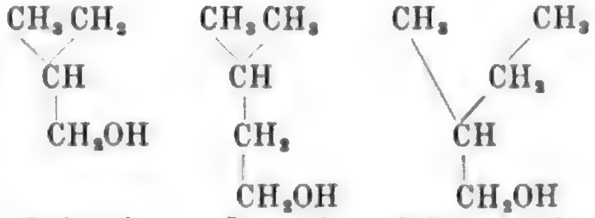
α) *Eiweißzersetzung durch Hefe.* Die Hefe enthält ein eiweißspaltendes Ferment, das Eiweiß wie siedende Säuren spaltet. Aus den Aminosäuren wird Ammoniak und Kohlensäure abgespalten, und der Rest der Aminosäure wird weiter oxydiert. Es scheint, als ob, wie bei der Oxydation mit Wasserstoffsuperoxyd, zunächst immer der Aldehyd entsteht, der einen Kohlenstoff weniger enthält, als die Aminosäure, und daß dieser dann sekundär entweder zu der betreffenden Säure oxydiert oder zu dem Alkohol reduziert wird. Daneben finden sich bisweilen auch niedere Homologe vor. Das Ammoniak wird zum Eiweißaufbau der Hefe verwendet, die Alkohole und Säuren verbleiben in der Kulturflüssigkeit und können dort nachgewiesen werden.

Aus Valin, Leucin und Isoleucin entstehen die drei Alkohole, die zusammen das Fuselöl bilden, Isobutylalkohol, Isoamylalkohol und aktiver Amylalkohol:



Valin — Leucin — Isoleucin

werden zu



Isobutylalkohol — Isoamylalkohol — aktiver Amylalkohol.

Aus Leucin entstehen daneben Isovaleraldehyd, Isovaleriansäure und Leucinsäure. Aus Glutaminsäure entsteht in der Hauptsache Bernsteinsäure, daneben Bernsteinsäurehalbaldehyd und Oxyglutarsäure. Aus Tyrosin entsteht Oxyphenyläthylalkohol, aus Phenylalanin Phenyläthylalkohol, aus Ornithin vielleicht Butylenglycol. Auch Milchsäure ist ein solches Umwandlungsprodukt. Der Angriff der Hefe erfolgt asymmetrisch, d. h. es wird nur die natürliche Aminosäure verwandelt, fügt man racemische Aminosäuren zur Hefe hinzu, so bleibt der nicht natürlich vorkommende Antipode ganz oder fast unangegriffen.

Die sogenannten Nebenprodukte der alkoholischen Gährung, die ja zum Teil unerwünscht sind, wie das Fuselöl, zum Teil aber auch die Geschmacks- und Geruchsstoffe der alkoholischen Getränke bilden, haben demnach gar nichts mit der Umwandlung des Zuckers in Alkohol und Kohlensäure zu tun, sondern entstammen dem Eiweißstoffwechsel der Hefe. Seit dieser Erkenntnis hat man auch bereits versucht, die Hefe statt mit Eiweiß mit Ammoniak oder mit bestimmten Aminosäuren zu ernähren, oder ihr andere Aminosäuren wegzunehmen, doch scheinen die Versuche bei der praktischen Anwendung noch auf Schwierigkeiten zu stoßen.

β) *Eiweißzersetzung durch Fäulnisbakterien.* Die Zersetzung des Eiweißes durch die ubiquitären Fäulnisbakterien oder die Bakterien des Darmkanals ist eine Zeitlang sehr eifrig studiert worden, und hat eine Reihe

Digitized by Google

Reihe von Bausteinen des Eiweißes erschließen lassen, lange ehe sie selbst direkt gefunden wurden. Später hat man nicht mehr beliebige „Fäulnisbakterien“ auf das Eiweiß wirken lassen, sondern Reinkulturen von bestimmten Bakterien, so den Rauschbrandbazillus unter anaeroben Bedingungen, andere Anaeroben, den Tuberkelbazillus, den Streptococcus longus, das Bacterium coli und den Proteus vulgaris, den Bacillus mesentericus vulgatus, der das „fadenziehende Brot“ macht, die Bakterien des „Gärströmlings“, eines skandinavischen Nahrungsmittels, das durch Einwirkung offenbar ganz bestimmter Mikroorganismen auf gesalzene Fische entsteht, die Bakterien, die das Casein der Milch bei der Reifung des Emmentaler Käses zersetzen und andere. Diese Mikroorganismen verhalten sich zum Teil sehr verschieden, und die Resultate besitzen daher ein hohes biologisches Interesse. Für die Eiweißchemie sind die Untersuchungen bedeutsamer, die nicht das ganze Eiweiß, sondern einzelne primäre Spaltungsprodukte der Bakterieneinwirkung aussetzten.

Die Bakterien spalten zunächst das Eiweiß in der gleichen Weise wie die Fermente; es entstehen erst Albumosen und Peptone, dann die Aminosäuren. Doch bleibt die Wirkung der Bakterien nur unter bestimmten Bedingungen, wie bei der normalen Käsebereitung, bei ihnen stehen. Sind doch gerade die α-Aminosäuren die besten Nährstoffe der Bakterien. Die Aminosäuren werden in verschiedener Weise weiter verwandelt. Es wird entweder

analog wie durch Alkalien oder Oxydationsmittel, das Ammoniak eliminiert, aus den Aminosäuren werden die entsprechenden einfachen Säuren, der Stickstoff des Eiweißes wird zu Ammoniak;

oder es wird Kohlendioxyd abgespalten, es entstehen Basen;

oder es werden, analog wie bei der Hefe und durch Wasserstoffsuperoxyd, Ammoniak und Kohlensäure eliminiert, und es entstehen Aldehyde, Alkohole, Säure nund Oxysäuren.

Ueber Umwandlungsprodukte des Glykokolls und Alanins ist nichts ganz Sicheres bekannt. Doch sind Ameisensäure, Essigsäure und Propionsäure bei vielen Fäulnisversuchen gefunden worden, außerdem Methylamin und Methan.

Valin, Leucin und Isoleucin werden durch manche Pilzarten genau wie durch Hefe zu den Alkoholen des Fuselöls. Ferner sind Buttersäure, Valeriansäure und Capronsäure wiederholt bei der Fäulnis gefunden, die wohl zum Teil auf diese Aminosäuren zu beziehen sind. In faulem Fleische ist Isoamylamin gefunden worden.

Aus Asparaginsäure wird Bernsteinsäure und Propionsäure, aus Glutaminsäure n-Buttersäure und γ-Aminobuttersäure gewonnen.

Für das Phenylalanin ergibt sich aus den älteren Untersuchungen der Abbau:

Phenylaminopropionsäure $C_6H_5CH_2CHNH_2COOH$
Phenylpropionsäure $C_6H_5CH_2CH_2COOH$
Phenylessigsäure $C_6H_5CH_2COOH$
Benzoesäure C_6H_5COOH

Daneben ist Phenyläthylamin gefunden. Für das Tyrosin ist folgende Reihe bekannt:

p-Oxyphenylaminopropionsäure	$C_6H_4.OH.CH_2CHNH_2COOH$
p-Oxyphenylpropionsäure . .	$C_6H_4.OH.CH_2CH_2COOH$
p-Oxyphenylessigsäure	$C_6H_4.OH.CH_2COOH$
p-Oxymandelsäure	$C_6H_4.OH.CH(OH)COOH$
p-Kresol	$C_6H_4.OH.CH_3$
Phenol	$C_6H_5.OH$

In faulem Fleisch und abnormem Käse bildet sich p-Oxyphenyläthylamin; auch im Mutterkorn ist es enthalten, bei dessen Bildung ja auch Bakterien eine Rolle spielen.

Das Tryptophan, die Indolaminopropionsäure bildet Indolpropionsäure, Indolessigsäure (Skatolcarbonsäure), Skatol und Indol. Auch die Bildung von Indolaldehyd ist wahrscheinlich, da im Harn ein Farbstoff vorhanden ist, der im Reagenzglas besonders leicht aus Indolaldehyd entsteht.

Phenol, Indol und Skatol gelten als charakteristische Fäulnisprodukte, da sie wegen ihres Geruches leicht nachweisbar sind, und weil sie als Endprodukte der Darmfäulnis resorbiert und als gepaarte Schwefelsäuren oder Glykuronsäuren im Harn ausgeschieden werden.

Urorosein, Skatolrot und Indican, drei Harnfarbstoffe, verdanken den Körpern ihre Entstehung, die aus dem Tryptophan von den Darmbakterien gebildet werden.

Aus dem Histidin entstehen Imidazolylpropionsäure und Imidazolylaethylamin. Das letztere ist von besonderem Interesse, weil es die oder eine der wirksamen Substanzen des Mutterkorns darstellt.

Aus Ornithin entsteht Tetramethylendiamin oder Putrescin

Digitized by Google

$$\begin{array}{l} CH_2NH_2 \\ CH_2 \\ CH_2 \\ CHNH_2 \\ COOH \end{array} - CO_2 = \begin{array}{l} CH_2NH_2 \\ CH_2 \\ CH_2 \\ CH_2NH_2 \end{array}$$

außerdem δ-Aminovaleriansäure.

Aus Lysin entsteht Pentamethylendiamin oder Kadaverin, $C_5H_{14}N_2$,

$$\begin{array}{l} CH_2NH_2 \\ CH_2 \\ CH_2 \\ CH_2 \\ CHNH_2 \\ COOH \end{array} - CO_2 = \begin{array}{l} CH_2NH_2 \\ CH_2 \\ CH_2 \\ CH_2 \\ CH_2NH_2 \end{array}$$

daneben vielleicht ε-Aminocapronsäure.

Aus Arginin können Bakterien Ornithin und dann Putrescin bilden, oder sie können Guanidin bilden, dies aber auch in Harnstoff verwandeln; im Mutterkorn findet sich Agmatin, $C_5H_{14}N_4$, das durch Kohlensäureabspaltung aus Arginin entsteht.

Aus dem Cystin wird Schwefelwasserstoff abgespalten, ein charakteristisches Fäulnisprodukt, daneben bildet sich Methylmerkaptan. Doch muß man hier mit Schlüssen auf seine Herkunft sehr vorsichtig sein, da es auch synthetisch gebildet werden kann; auch unterschweflige Säure und Aethylsulfid sind beobachtet.

Die giftigen Stoffwechselprodukte der Bakterien scheinen Eiweißkörper zu sein, gehören aber nicht hierher.

γ) Die Spaltung im Stoffwechsel der Pflanzen. In den Samen der Pflanzen befinden sich Eiweißkörper, die dem wachsenden Embryo als Reservematerial dienen und die beim Beginn der Keimung durch proteolytische Enzyme zerlegt werden. Diese Enzyme erzeugen die Aminosäuren. Da nun im Gegensatz zu den Tieren mit ihrem Zirkulationssystem die Aminosäuren nicht fortgeführt werden, bleiben sie in dem Keim oder den Keimblättern liegen. Weiterhin beginnt in den Pflanzen eine Synthese, bei der aus einem Teile der Monoaminosäuren Ammoniak abgespalten wird und dieses sich mit nicht veränderten Monoaminosäuren zu Amiden vereinigt. Aus Asparaginsäure und Glutaminsäure werden Asparagin, $C_4H_8N_2O_3$, und Glutamin, $C_5H_{10}N_2O_3$. Beide finden sich als Reservematerial in den Keimen vor, können auch in diesem Stadium transportiert werden. Aus beiden wird dann, durch weitere kompliziertere Synthesen, Eiweiß gebildet, eventuell unter Eintritt stickstofffreien Materials, das aus den stets vorhandenen Kohlehydraten, vielleicht auch aus dem stickstofffreien Rest der Monoaminosäuren, stammen kann. Ueber etwaige Zwischenstufen zwischen Aminosäuren oder Amiden und Eiweiß ist nichts bekannt. Guanidin, Ornithin, Tetra- und Pentamethylendiamin fehlen in allen untersuchten Pflanzen. Ammoniak findet sich nur, wenn durch Abschluß des Lichtes die Synthese aufgehoben ist. Im späteren Leben bauen die Pflanzen ihr Eiweiß aus Kohlehydraten und anorganischem Stickstoff, d. h. in letzter Linie Ammoniak, auf. Zwischenglieder in diesem Prozeß sind aber nicht bekannt.

Dagegen sind einige besondere Umwandlungen einzelner Aminosäuren im Pflanzenreiche bekannt, die wohl speziellen Funktionen dienen. So wird das Tyrosin durch ein Oxydationsferment, die Tyrosinase, in rote, braune, schließlich schwarze Produkte umgewandelt. Tyrosinhaltige Peptide werden ebenfalls angegriffen, und geben dann zum Teil grüne oder blaue Farben. Auf der Wirkung der Tyrosinase beruht die Buntfärbung der Blätter im Herbst, die Dunkelfärbung an der Schnittfläche von Pilzen, Rüben und anderen Pflanzen, die Bildung des schwarzen Lackes durch den Saft des ostindischen Lackbaumes usw. Sodann findet man in Pflanzen methylierte Aminosäuren, die sogenannten Betaine. Klar sind in ihren Beziehungen zu Eiweißspaltungsprodukten das Betain oder Trimethylglykokoll, das Stachydrin oder Dimethylprolin, das Hordenin oder Dimethyl-p-oxyphenyläthylamin, und das Tetramethylputrescin aus Hyoscyamus muticus. Die Pyrrolidinderivate sind auf Prolin oder Ornithin zurückzuführen. Auch das Surinamin und das Trigonellin gehören hierher. Die Bedeutung der Methylisierung und der Betaine für den Stoffwechsel der Pflanzen ist nicht bekannt. Die Betaine aber stehen in naher chemischer Beziehung zu den Alkaloiden der Pflanzen. Das Methylmerkaptan, das nach Spargelgenuß im Harn auftritt, verdankt seinen Umfang wahrscheinlich auch einem methylierten Umwandlungsprodukt des Cystins in den Spargeln.

δ) Die Eiweißspaltung im tierischen Stoffwechsel. Das von den höheren Tieren verzehrte Nahrungseiweiß wird im Magendarmkanal durch die proteolytischen Fermente Pepsin, Trypsin und Erepsin in der Hauptsache bis zu den Aminosäuren gespalten; ein gewisser Anteil wird vermutlich auch als Pepton resorbiert, das dann in den Organen durch deren proteolytische Fermente ganz aufgespalten wird, verhält sich also schwerlich anders als die Hauptmenge. Jahrelang war die allgemeine Meinung der Physiologen, daß das Nahrungseiweiß in Form der Aminosäuren resorbiert, den Organen zugeführt und dort verwertet werde, sei es um verbrannt zu werden, sei es um zum Aufbau der Organeiweiße zu dienen. Diesen Aufbau,

Digitized by Google

der ja die besondere Funktion des Eiweißes ist, stellte man sich so vor, daß die Aminosäuren dabei so zusammengefügt wurden, wie der Chemiker sie beim Aufbau der Peptide aneinanderlegt, eine Neubildung von Aminosäuren wurde nicht angenommen, und demnach wurde auf den Aufbau der Eiweiße aus verschiedenen Aminosäuren auch für den Stoffwechsel und die ernährende Funktion des Eiweißes Wert gelegt. Diese Anschauung ist neuerdings unhaltbar geworden, es ist wahrscheinlicher, daß der Tierkörper sein Organeiweiß ebenso wie die Pflanze und die Pilze aus Kohlehydraten und Ammoniak aufbaut.

Von den Zwischenprodukten dieses Aufbaues und des in der Regel überwiegenden Abbaues wiesen wir indessen noch relativ wenig. Das Eiweiß verläßt den Körper, verbrannt zu Wasser, Kohlensäure und Harnstoff. Der Weg von den Aminosäuren zu den Endprodukten liegt für uns noch zum großen Teil im Dunkel, und nur bestimmte experimentelle und pathologische Tatsachen gestatten, einige Streiflichter auf ihn zu werfen.

1. Es erfolgt eine Eliminierung des Ammoniaks aus den Aminosäuren. Sie ist bei Fischen beim Durchtritt durch die Darmwand beobachtet, bei Säugetieren bei Leberdurchblutung. In der Leber werden die Aminosäuren in die betreffenden Ketosäuren überführt, die nachträglich zu den Alkoholsäuren oder den einfachen Säuren reduziert werden können. Unter pathologischen Umständen (Phosphorvergiftung) können die Umwandlungsprodukte mit dem Harn ausgeschieden werden. Beobachtet sind: Tyrosin, p-Oxyphenylbrenztraubensäure, p-Oxyphenylmilchsäure, Phenylalanin, Phenylmilchsäure;

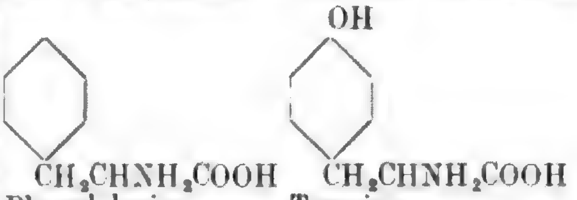
Phenylaminoessigsäure, Phenylglyoxylsäure, Mandelsäure, Benzoesäure;

Alanin, Milchsäure.

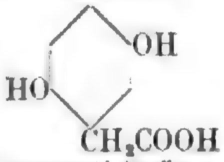
2. Die Eiweißspaltungsprodukte Leucin, Tyrosin und Phenylalanin nebst anderen Körpern werden bei Durchblutung der überlebenden Leber zu Acetessigsäure, die entweder zu Aceton weiter umgewandelt oder zu Oxybuttersäure reduziert werden kann.

3. Als pathologische Abnormität, bei der sogenannten Alkaptonurie, gelangt ein Körper des intermediären Stoffwechsels, die Homogentisinsäure, zur Ausscheidung. Wenn man auch nicht mit voller Sicherheit ausschließen kann, daß „der Wagen nicht schon früher auf ein falsches Geleise gelaufen" ist, so nimmt man doch allgemein an, daß die weitere Oxydation eines normal entstehenden Körpers gehemmt ist und dieser daher durch die Nieren den Körper verläßt, eine chemische Hemmungsmißbildung.

Die Homogentisinsäure ist Dioxyphenylessigsäure. Sie entsteht aus dem Tyrosin und, dem Phenylalanin. Die drei Formelbilder



Phenylalanin Tyrosin



Homogentisinsäure

beweisen, daß nicht nur an der Seitenkette, sondern auch am Benzolkern durch gleichzeitige Oxydation und Reduktion Veränderungen vor sich gehen, wobei die Bildung chinolähnlicher Zwischenglieder wahrscheinlich ist. Die Alkaptonurie ist oft benutzt worden, um die Beziehung des Tyrosins oder Phenylalanins zu hypothetischen Zwischengliedern, die Umsetzung tyrosinhaltiger oder tyrosinähnlicher Körper zu studieren.

4. Eine zweite derartige chemische Mißbildung ist die Cystinurie, bei der Cystin in größerer oder kleinerer Menge mit dem Harn entleert wird. Bei einem Teil der Fälle erleiden Ornithin und Lysin eine Umwandlung, indem sie, ganz wie durch Fäulnisbakterien, unter Abspaltung von Kohlendioxyd in Tetra- und Pentamethylendiamin übergeführt und als solche ausgeschieden werden. Es besteht neben der Cystinurie eine Diaminurie oder Ptomainurie. Analog der Alkaptonurie schließt man aus der Ptomainurie, daß der normale Abbau der beiden Diaminosäuren über die Diamine führt.

5. Eine entsprechende Abspaltung von Kohlendioxyd läßt aus dem Arginin aus dem das Agmatin entstehen, das sich im Heringssperma findet.

6. Eine analoge Kohlendioxydabspaltung ist es, wenn aus Asparaginsäure β-Alanin und aus Glutaminsäure γ-Aminobuttersäure entsteht.

7. Durch Kohlendioxydabspaltung und gleichzeitige Oxydation des Schwefels entsteht aus dem Cystin das Taurin.

8. Methylierungen im Tierkörper sind bei mit Phosphor vergifteten Hunden beobachtet, die im Harn Trimethyl-γ-aminobuttersäure ausscheiden; die Muskeln von Krebsen enthalten Betain oder Trimethylglykokoll.

9. Im Fleischextrakt und im Harn findet sich Methyl- und Dimethylguanidin, die wenigstens möglicherweise Abkömmlinge des Eiweißes sind. Auch Beziehungen zum Kreatin ergeben sich.

Digitized by Google

10. Aus Tryptophan entsteht im Organismus des Hundes γ-Oxychinolincarbonsäure oder Kynurensäure.

11. Glykokoll kann nicht nur direkt aus Eiweiß entstehen, sondern es entsteht im Körper als entgiftender Paarling in solchen Mengen, daß seine Bildung aus anderen Aminosäuren notwendig ist.

12. Physiologisch wichtig, aber chemisch ganz unaufgeklärt ist, daß der größere Teil des Kohlenstoffs des Eiweißes im Körper zu Traubenzucker beziehungsweise Glykogen wird. Der Weg von den Aminosäuren zu den Kohlehydraten ist kein direkter. Vielmehr werden die Spaltungsprodukte offenbar erst sehr weitgehend abgebaut und dann von neuem synthetisiert. Der Kohlenstoff des Glykokolls und Alanins wird vollständig in Glucose verwandelt, von den Kohlenstoffatomen der Asparagin- und Glutaminsäure je drei. Tyrosin und Glukosamin geben keine Glukose. Aus 100 g Eiweiß können 58 g Glukose gebildet werden.

13. Umgekehrt wie aus den Beobachtungen bei der Alkaptonurie kann man aus der Nichtverbrennlichkeit mancher Körper darauf schließen, daß sie nicht im Stoffwechsel auftreten. So wird subkutan gegebenes Tryptophan vollständig verbrannt; wenn es aber durch die Bakterien des Darms vorher in Indol verwandelt ist, wird es größtenteils ausgeschieden. Indol ist danach kein normales Produkt des intermediären Stoffwechsels.

14. Unter den sekundären Umwandlungsprodukten von Aminosäuren im Pflanzenstoffwechsel sind die dunkelgefärbten Stoffe genannt worden, die durch Tyrosinase aus dem Tyrosin entstehen. Ganz ähnliche oder identische Stoffe werden auch im Tierreiche gefunden, und Melanine genannt. Dahin gehören die Tinte der Sepia und anderer Cephalopoden, die Pigmente der menschlichen und tierischen Haare, der Negerhaut, des Auges und mancher Geschwülste. Die am meisten untersuchten Melanine der Geschwülste sind in trockenem Zustande schwarze, glänzende Massen, als feines Pulver sehen sie heller, mehr braun aus. Sie sind in Wasser, Säuren, neutralen Salzlösungen, Alkohol, Amylalkohol Aether, Chloroform, Benzol usw. unlöslich, In Alkalien, Ammoniak oder kohlensauren Alkalien lösen sich die Melanine dagegen leicht zu einer, bei stärkerer Konzentration schwarz- oder braunroten, in größerer Verdünnung gelbbraunen Flüssigkeit auf, aus der sie durch Säuren gefällt werden. Rein dargestellt sind die Melanine aus den Geweben nicht, man hat häufig Gemenge von Melanin mit Eiweißkörpern und anderen untersucht. Die Analysen ergeben etwa 58% C, 4% H, 11% N. Ueber die Humine s. o. Abschnitt 2.

7. Reaktionen. Als chemisch übereinstimmend gebaute Körper haben die Eiweiße eine Reihe von Reaktionen miteinander gemein, von denen zwar keine an sich für das Eiweiß charakteristisch ist, die aber, wenn sie alle oder doch mehrere von ihnen zusammen auftreten, einen Körper als Eiweiß erkennen lassen.

I. Die Farbenreaktionen. Mit Ausnahme der Biuretreaktion ist keine der Farbenreaktionen dem Eiweiß als solchem eigentümlich, sie kommen vielmehr alle gewissen anderen Komplexen beziehentlich Atomgruppierungen zu und werden von dem Eiweiß deshalb gegeben, weil diese Gruppen im Eiweißmokül in reaktionsfähiger Form enthalten sind. Sie beweisen daher die An- oder Abwesenheit der betreffenden Gruppe und dienen dadurch zur Charakterisierung der einzelnen Eiweißkörper.

1. Die Xanthoproteinreaktion. Fügt man zu einer wässerigen Eiweißlösung starke Salpetersäure, so tritt entweder schon in der Kälte, in der Regel erst beim Erwärmen eine tiefe dunkle Gelbfärbung ein, die beim Zusatz von überschüssiger Natronlauge rotbraun, mit Ammoniak schön orangefarben wird. Die Reaktion beruht auf der Bildung von Nitroderivaten und ist der Indolgruppe im Tryptophan und den Benzolderivaten zuzuschreiben.

2. Die Millonsche Reaktion. Kocht man Eiweiß in wässeriger Lösung oder Eiweiß in Substanz in Wasser aufgeschwemmt mit dem sogenannten Millonschen Reagens, einer Lösung von salpetersaurem Quecksilberoxyd, die etwas salpetrige Säure enthält, so färbt sich die Flüssigkeit wie der entstandene Niederschlag rosa bis schwarzrot. Die Reaktion wird von allen Benzolderivaten gegeben, die einen Wasserstoff durch die Hydroxylgruppe ersetzt haben; sie entspricht im Eiweiß der Tyrosingruppe, der einzigen Oxyphenylgruppe. Eintritt von Jod in das Tyrosinmolekül verhindert die Millonsche Reaktion, die daher von Jodeiweißen nicht gegeben wird. Chlornatrium in etwas stärkerer Konzentration verhindert die Reaktion.

3. Die Paulysche Diazoreaktion. Versetzt man eine Eiweißlösung mit Soda und fügt 3 bis 5 ccm einer Sodalösung hinzu, die einige Zentigramm Diazobenzolsulfosäure enthält — die am besten frisch aus Sulfanilsäure bereitet wird —, so tritt eine kirschrote Färbung ein, die beim Verdünnen mit Wasser beständig ist. Beim Ansäuern nimmt die Lösung einen orangeroten Ton an. Die Reaktion wird von den Eiweißspaltungsprodukten Tyrosin und Histidin gegeben und kommt, da beide sehr verbreitet sind, den meisten Eiweißkörpern zu.

4. Die Schwefelbleireaktion. Wenn man Eiweiß mit Alkalilauge und einem Bleisalz kocht, so bildet sich ein schwarzer Nieder-

Digitized by Google

schlag, oder doch zum mindesten eine Schwarz- oder Braunfärbung. Die Reaktion beruht auf der Abspaltung von Schwefelwasserstoff und der darauf folgenden Bildung von Schwefelblei; sie gehört dem Cystin an.

5. Die Reaktion von Adamkiewicz-Hopkins. Man fügt zu einer wässerigen Eiweißlösung einige Tropfen einer wässerigen Lösung von Glyoxylsäure und unterschichtet mit konzentrierter Schwefelsäure. An der Berührungsstelle entsteht ein blauvioletter Ring. Die Reaktion ist sehr empfindlich. Sie beruht auf dem Tryptophan. Auch andere, besonders aromatische, Aldehyde geben mit dem Eiweiß, d. h. dessen Tryptophangruppe, farbige Reaktionen.

6. Die Reaktion von Molisch. Diese Reaktion ist eine Kohlehydratreaktion und beruht auf der Bildung von Furfurol. Sie wird nur von dem Eiweiß gegeben, das eine Kohlehydratgruppe enthält, d. h. von den Glykoproteiden. Da viele Eiweißstoffe Kohlehydrate beigemengt enthalten, und die Reaktion sehr empfindlich ist, hat sie viel Verwirrung angerichtet.

7. Die Biuretreaktion. Fügt man zu einer wässerigen Eiweißlösung eine reichliche Menge Natron- oder Kalilauge und wenige Tropfen einer verdünnten Lösung von Kupfersulfat, so entsteht bei den nativen Eiweißkörpern eine blau- bis rotviolette, bei den Umwandlungsprodukten, den Albumosen und Peptonen, sowie bei einigen Vitellinen und den Histonen eine rein rote Färbung. Für die praktische Ausführung ist von Wichtigkeit, daß ein Ueberschuß von Kupfersulfat infolge der entstehenden Blaufärbung die Reaktion verdeckt. Auch darf bei Ausführung der Biuretreaktion nicht erwärmt werden, da heiße Natronlauge viele Peptone zersetzt.

Die Biuretreaktion ist dadurch von einer besonderen Wichtigkeit, daß sie im Gegensatz zu den anderen Reaktionen, mit einer Ausnahme, keinem der nicht mehr eiweißartigen Spaltungsprodukte des Eiweißes zukommt. Sie wird daher allgemein zur Abgrenzung des Eiweißes gegen seine einfacheren Spaltungsprodukte benutzt und gewöhnlich als die wichtigste Farbenreaktion der Eiweißkörper bezeichnet. Denn da Biuret, Malonamid, Oxamid usw. in der Natur nicht vorkommen und bei physiologisch-chemischen Arbeiten nicht auftreten, so beweist sie das Vorhandensein von Körpern der Eiweißgruppe. Wenn das Eiweiß durch Fermente oder Säuren zerstört wurde, so sah man das Verschwinden der Biuretreaktion als den Beweis der vollständigen Zertrümmerung des Eiweiß an. Diese Wertschätzung ist sehr übertrieben. Denn es existieren Peptide und Peptone, die keine Biuretreaktion geben, und von den Aminosäuren zeigt das Histidin eine Andeutung von Biuretreaktion. Doch ist die Scheidung praktisch häufig brauchbar, z. B. bei Zerlegung der Pepsinpeptone durch andere Fermente oder bei der Ausfällung von Eiweiß aus Gewebsextrakten oder zum Nachweis von Peptonen und Albumosen. Die Pepsinpeptone geben die Reaktion noch in einer Verdünnung 1:100000; für Albumosen und natives Eiweiß ist die Empfindlichkeit geringer. Unter den Albumosen scheinen sich Körper zu befinden, die den Eintritt der Reaktion stören. — Die stark basischen Protamine geben die Biuretreaktion ohne Alkalizusatz, das kupferhaltige Hämocyanin ohne Kupferzusatz.

II. Die Fällungsreaktionen. Die Eiweißkörper sind im allgemeinen nur in Wasser löslich und werden daher bei Zusatz von Aceton, Chloroform, Aether gefällt. Am wichtigsten ist die Fällung mit Alkohol. In absolutem Alkohol sind alle Eiweißkörper unlöslich, der Grad der fällenden Verdünnung ist dagegen bei den einzelnen Eiweißkörpern sehr verschieden und dient zu ihrer Charakterisierung. Die alkohollöslichen Pflanzeneiweiße sind in absolutem Alkohol unlöslich, in Alkohol von 90% aber löslicher als in Wasser. Die Chloride und Natronsalze des Eiweißes, zumal des denaturierten Eiweißes, sind in Alkohol viel löslicher als die Eiweiße selbst, so daß bei nicht neutraler Reaktion Alkohol schwer fällt. Wie Basen verhalten sich Harnstoff und alkohollösliche Salze, indem sie die Löslichkeit in Alkohol erhöhen.

Von dem Aussalzen, von der Hitzekoagulation und dem Ausflocken wird in Abschnitt II die Rede sein.

Mit einer Reihe von Säuren und Basen bilden die Eiweißkörper schwer- oder unlösliche Verbindungen und werden so aus wässeriger Lösung gefällt. Diese Fällungsreaktionen zeigen bei den kolloidalen Eiweißkörpern eine Reihe von Eigentümlichkeiten, die ebenfalls in Abschnitt II besprochen werden. Bei den Albumosen und Peptonen treten die Fällungen schwerer ein als bei den eigentlichen Eiweißen, und um so schwerer, je weiter sie vom Eiweiß abstehen.

a) Die Fällungen der Eiweißkörper mit Salzen der Schwermetalle. Sie erfolgen bei jeder Reaktion. Die Fällungen sind im Ueberschuß des Eiweißes und des Metallsalzes löslich. Fast alle Schwermetalle fällen, häufige Anwendung finden davon die folgenden:

1. Eisenchlorid und Eisenacetat. Im Ueberschuß des Eisenchlorids lösen sich die Eiweißfällungen leicht auf.

2. Kupfersulfat und das noch empfindlichere Kupferacetat.

3. Quecksilberchlorid. Wegen seiner

desinfizierenden Eigenschaften ist es von praktischer Wichtigkeit.

4. Bleiacetat, basisches und neutrales.

5. Zinkacetat.

6. Uranylacetat. Es wurde bei der Reinigung der Fermente von Eiweißkörpern benutzt.

Außer von den Schwermetallen wird das Eiweiß von einer Reihe organischer Basen, Farbbasen, gefällt, so durch Malachitgrün, Brillantgrün, Neufuchsin, Auramin, Phenolsafranin und Rosanilinacetat.

Analog verhalten sich einige basische Eiweißkörper, die Histone und Protamine, die in alkalischer Reaktion anderes Eiweiß fällen.

2. Fällung durch Säuren. Alkaloidreagenzien. Als organische Base wird das Eiweiß durch eine Reihe komplexer organischer Säuren, die sogenannten Alkaloidreagenzien, gefällt. Da aber die Eiweißkörper sehr schwache Basen sind, so werden die Salze, das phosphorwolframsaure usw. Eiweiß, durch die Ionen des Wassers hydrolysiert, und die Niederschläge bilden sich nur bei einem Ueberschuß von Säure. Bei alkalischer Reaktion lösen sie sich wieder auf; nur einige stärker basische Eiweiße, die Histone, das Histopepton und besonders die Protamine, werden auch bei schwach alkalischer oder mindestens neutraler Reaktion gefällt. Schon bei den eigentlichen Eiweißen, noch mehr bei den Peptonen und einem Teil der Albumosen sind die Niederschläge im Ueberschuß des Fällungsmittels löslich.

Die wichtigsten Alkaloidreagenzien sind:

Phosphorwolframsäure, und, seltener angewandt, Phosphormolybdänsäure. Beide fällen außerdem die basischen Aminosäuren und die meisten Peptone. Phosphorwolframsaure Peptone (und Aminosäuren) sind in Alkohol und Aceton löslich.

Gerbsäure (Vorschrift 70 Gerbsäure, 100 g ClNa, 50 cm Eisessig ad 1000 Wasser). Sie fällt auch die meisten Peptone. Besonderheiten s. u. Abschnitt 11. Gerbsaure Peptone sind in Aceton löslich.

Ferrocyanwasserstoffsäure. Meist als Ferrocyankalium und Essigsäure, in dieser Form klinische Eiweißprobe.

Pikrinsäure mit Essigsäure, als „Eßbachs Reagens" klinische Eiweißprobe.

Jodquecksilberjodkalium + Salzsäure, sogenanntes Brückesches Reagens.

Jodwismut-Jodkalium + Jodwasserstoffsäure (50 KJ, 100 BiJ_3 in 100 cm 0,5 JH.

Das Fällungsvermögen nimmt zu, wenn die Lösung reichlich Neutralsalze enthält.

Auch Jod-Jod-Kalium, Metaphosphorsäure, Platinchlorid, Quecksilberchlorid, Bromwasser, Allotellursäure fällen Eiweiß. Ebenso verhalten sich manche saure Anilinsalze, die gefärbte und daher gut erkennbare Niederschläge geben. Fällende Eigenschaften besitzen auch einige, komplizierte organische Säuren, Nucleinsäure Taurocholsäure, Chondroitinschwefelsäure, auch sie nur bei saurer Reaktion.

Etwas verschieden von dem Besprochenen ist die Fällung der Eiweißkörper, auch mancher Albumosen, durch starke Mineralsäuren, Salzsäure, Schwefelsäure, Salpetersäure und Phosphorsäure. Von diesen ist wichtig die Salpetersäure. Die Reaktion mit Salpetersäure ist sehr empfinlich und wird daher als klinische Eiweißprobe im Harn angewandt. Die eigentlichen Eiweiße lösen sich im Ueberschuß der Salpetersäure und beim Erwärmen nicht, wohl aber die Albumosen. Beim Erkalten kommt der Niederschlag wieder. Beim Erwärmen tritt nebenher die Xanthoproteinreaktion auf.

8. Albumosen und Peptone. Wenn die in der Natur vorkommenden Eiweißkörper durch irgendwelche Eingriffe gespalten werden, so zerfallen sie zunächst in die Albumosen und Peptone. Diese sind selbst noch Eiweißkörper im weiteren Sinne, denn sie besitzen dieselbe chemische Struktur und zerfallen in dieselben Bruchstücke. Sie geben daher auch die chemischen Reaktionen der Eiweißkörper, die Farbenreaktionen, vor allem die Biuretreaktion, und die Fällungen mit Säuren und Basen. Doch sind die Albumossen und ihre Salze viel löslicher, so daß sie, je weiter sie sich von den Eiweißkörpern entfernen, desto schwerer gefällt werden und eine Anzahl von Reaktionen teils nicht mehr, teils nur unter besonderen Bedingungen zeigen. Dagegen fehlen ihnen die physikalischen Eigenschaften des Eiweiß, diejenigen, die auf seiner Molekulargröße und seinen „kolloidalen" Eigenschaften beruhen. Man hat sie daher von jeher mit den Dextrinen, Di- und Monosacchariden in Parallele gestellt, die aus den kolloidalen Kohlehydraten entstehen.

Der Uebergang von den nativen Eiweißkörpern zu den Aminsäuren ist nun ein sehr allmählicher und erfolgt über eine große Reihe von Zwischenstufen. Da er noch nirgends völlig aufgeklärt ist und aus der sehr großen Zahl der existierenden Körper nur wenige als chemische Individuen erkannt sind, ist die Einteilung zurzeit schwierig und willkürlich. Früher nannte man diese Körper Peptone, und der Name ist noch vielfach gebräuchlich und bisweilen kaum zu umgehen. Die heute geltende Einteilung stammt von Kühne. Er nennt Peptone diejenigen Eiweißkörper, die überhaupt nicht ausgesalzen werden können; sie geben die Fällungsreaktionen nur noch zum Teil, von den Farbenreaktionen ausnahmslos die Biuretreaktion, die übrigen nur sehr teilweise. Dagegen werden alle diejenigen löslichen Spaltungsprodukte des Ei-

Digitized by Google

weiß, die nicht mehr koaguliert werden können, aber durch irgendwelche Salze (am wirksamsten sind Ammonsulfat und Zinksulfat bei saurer Reaktion) ausgesalzen werden können, als Albumosen bezeichnet. Sie werden wieder eingeteilt in primäre Albumosen, die dem Eiweiß zum Teil noch recht nahe stehen, und in Deuteroalbumosen, deren Abgrenzung gegen die Peptone ziemlich willkürlich ist. An die Peptone schließen sich die synthetischen Polypeptide an. Hier irgendeine Grenze ziehen zu wollen, wäre ganz willkürlich. Am besten erscheint es, wenn man die ihrer Struktur nach vollständig bekannten Körper Polypeptide, und die, bei denen das nicht der Fall ist, Peptone nennt. Die Trennung der Albumosen von den Peptonen auf Grund ihrer Aussalzbarkeit hat Bedenken, da unter den künstlichen Peptiden, die gar nicht besonders hochmolekular sind, einige aussalzbar sind. Indessen ist es auch nicht angebracht, diese Unterscheidung ganz fallen zu lassen. Denn bei der Säurespaltung und bei der besonders genau studierten Pepsinverdauung entstehen anfangs ganz überwiegend aussalzbare Körper; in dem Maße, wie die Verdauung fortschreitet, gehen immer größere Anteile in die nicht aussalzbare Form über Auch die geringere Dialysierfähigkeit und geringere Löslichkeit der Albumosen sprechen durchaus dafür, daß sie wirklich ein größeres Molekulargewicht haben und zwischen dem Ausgangseiweiß und den Peptonen stehen.

Genauer untersucht sind die Albumosen bei der Pepsinverdauung; weniger häufig die Albumosen der Spaltung durch verdünnte Säuren, Alkalien und überhitzten Dampf. Von Peptonen sind untersucht die der Pepsin- und Trypsinverdauung und die durch Säurespaltung entstehenden sogenannten Kyrine, ferner Alkalipeptone und die aus den Protaminen entstehenden Protone, außerdem Peptone, die in Pflanzen, im Fleischextrakt und im Harn vorkommen. Endlich sind außerdem durch Abbau mittels Säuren, Alkalien und Fermenten genau gekannte Peptide gewonnen worden.

Die Albumosen sind in trockenem Zustande weiße, staubende, nicht hygroskopische, nicht kristallinisch gewonnene Pulver. Mit Ausnahme der Heteroalbumose sind sie in Wasser leicht löslich, noch löslicher sind viele ihrer Salze. Durch Alkohol werden alle, aber bei sehr verschiedener Konzentration gefällt, in verdünnten Alkoholen sind sie zum Teil leicht löslich. Die Biuretreaktion geben die Albumosen mit einer roten, ins Violette spielenden Farbe. Ebenso geben alle die Xanthoproteinreaktion. Die anderen Farbenreaktionen richten sich nach den Komplexen, die in den einzelnen Körpern enthalten sind.

Die Albumosen werden durch Eisenchlorid, neutrales und basisches essigsaures Blei, Quecksilberchlorid und andere Metallsalze gefällt, die Niederschläge sind aber im Ueberschusse der Fällungsmittel mehr oder weniger leicht löslich. Kupfersulfat und das empfindlichere Kupferacetat fällen nur die primären, nicht die Deuteroalbumosen, dienen daher zu ihrer Trennung. Essigsäure plus Ferrocyankalium, fällt alle Albumosen; doch kann die Anwesenheit von Pepton die Reaktion stören. Der Niederschlag verschwindet beim Erhitzen und kehrt in der Kälte wieder. Durch Salpetersäure werden die primären Albumosen auch in salzarmer Lösung, die Deuteroalbumosen nur bei Gegenwart von Kochsalz, die niedrigsten schließlich nur in mit Kochsalz gesättigter Lösung gefällt. Der Niederschlag ist im Ueberschusse der Salpetersäure, besonders aber beim Erwärmen, löslich, und kehrt beim Abkühlen wieder. — Durch die Alkaloidreagenzien werden die Albumosen gefällt, die Niederschläge verhalten sich zum Teil wie die des nativen Eiweiß, zum Teil sind sie in der Wärme und im Ueberschuß sehr leicht löslich. Taurocholsäure, daher Galle bei saurer Raektion, und Nucleinsäure fällen einen Teil der Albumosen. Die primären Albumosen werden bei alkalischer Reaktion durch Protamin und Histon gefällt. — Die Albumosen diffundieren durch Pergament, aber verschieden schnell, die Heteroalbumose sehr langsam, die Protalbumose und manche Deuteroalbumosen schnell und vollständig.

Beim Aussalzen scheiden sich die Albumosen als ein zäher, klebriger Niederschlag aus, der auf der Flüssigkeit schwimmt oder an der Wand des Gefäßes oder an einem zum Rühren dienenden Instrument haftet und oft besser durch Ausrühren oder Abschöpfen als durch Filtrieren entfernt werden kann.

Zur Untersuchung der Albumosen hat meist das „Peptonum siccum" von F. Witte in Rostock gedient, das zum größten Teil aus Albumosen besteht. Später hat man die Albumosen häufig aus bestimmten Eiweißkörpern gewonnen. Die Albumosen der einzelnen Eiweiße werden je nach der Herkunft aus Globulin, Vitellin, Myosin, Gelatine, Fibrin usw. als Globulosen, Vitellosen, Myosinosen, Gelatosen, Fibrinosen bezeichnet; Albumosen würden danach nur die Spaltungsprodukte des Eier- oder Serumalbumins heißen, doch wird der Name allgemein auch auf die Produkte der anderen Eiweißkörper ausgedehnt. Chittenden hat dafür den besonders im Englischen viel gebrauchten Namen Proteosen eingeführt.

Die Heteroalbumosen, daher auch das Albumosengemenge, das Wittepepton, u. a. zeigen bei parenteraler, d. h. bei Zufuhr direkt in die Blutbahn eine Reihe von Giftwirkun-

Digitized by Google

gen, Blutdruckerniedrigung, Ungerinnbarmachen des Blutes usw.

Die Peptone sind farblose, trockene Pulver. Sie sind in Wasser ungemein löslich, auch in Eisessig, ebenso in allen Salzlösungen, zum Teil löslich in 96proz. Alkohol, unlöslich in allen anderen gebräuchlichen Lösungsmitteln. Sie geben alle noch in großer Verdünnung eine sehr intensive, rein rote Biuretreaktion, außerdem alle die Xanthoproteinreaktion, die anderen Farbenreaktionen sind verschieden. Sie sind schwefelfrei. Die Schwermetalle bewirken keine Fällungen; die Alkaloidreagenzien fällen mit Ausnahme von Ferrocyanwasserstoffsäure und Pikrinsäure, doch sind die Fällungen unvollständig und lösen sich im Ueberschuß des Reagens oder auch nur von Säure meist leicht wieder auf. Die Fällbarkeit der Peptone nimmt zu, wenn man sie in gesättigten Salzlösungen (Ammonsulfat, Calciumchlorid, Calciumnitrat, Natriumchlorid) fällt. Ohne Salzzusätze fällt noch am vollständigsten die Phosphorwolframsäure. Im Gegensatz zu den Eiweißbasen wird die Fällbarkeit der Peptone durch Gegenwart von Schwefelsäure nicht erhöht, eher vermindert. Oft kommt man gut zum Ziel, wenn man zunächst den größten Teil der Peptone mit Phosphorwolframsäure fällt, abfiltriert, und nun erst den Rest ausfällt. In verdünnter Lösung bleibt die Fällung aber auch dann noch unvollkommen. Die Niederschläge der Peptone mit Phosphorwolframsäure sind in Alkohol und Aceton löslich. Die argininreichen Peptone werden wie das Arginin selbst durch Silbersulfat und Sättigen der Lösung mit Barythydrat gefällt.

Wie alle Eiweißkörper sind die Peptone amphotere Elektrolyte, der Säurecharakter überwiegt bei ihnen beträchtlich; sie sind ausgesprochene Säuren, deren Salze relativ wenig hydrolysiert werden.

Bei der Pepsinverdauung entsteht zunächst Acidalbumin, dann die primären Albumosen, die Proto- und Heteroalbumose, die durch Sättigen mit Chlornatrium und durch Halbsättigung mit Ammonsulfat fällbar sind. Aus ihnen entstehen die Deuteroalbumosen, die nur durch Ammonsulfat gefällt werden, daraus schließlich die Peptone. Doch ist die Reihenfolge nur so zu verstehen, daß anfangs die mit Kochsalz aussalzbaren Albumosen überwiegen, später die Deuteroalbumosen, und daß endlich bei genügend langer Verdauung, wirksamem Pepsin und viel Salzsäure die Albumosen ganz verschwinden. Kleine Mengen Peptone finden sich aber schon im Beginn der Verdauung und ebenso treten von Anfang an Peptone auf, die keine Biuretreaktion geben. Die Bedeutung der Albumosen ist früher sowohl für die Eiweißchemie wie in biologischer Hinsicht sehr hoch eingeschätzt worden. Heute wissen wir, daß bei den günstigen Verhältnissen des lebenden Magens der größte Teil des Eiweißes zu Pepton wird, und die Albumosen nur Durchgangsstufen sind. Bei der Verdauung in vitro kann man allerdings beträchtliche Mengen von Albumosen bekommen.

Die vielfachen Versuche zur Zerlegung der Albumosen haben bisher kaum mehr zu Körpern geführt, die eine Gewähr für chemische Reinheit bieten. Eine Ausnahme macht vielleicht die Heteroalbumose, die den schwerst angreifbaren, beziehungsweise den noch nicht angegriffenen Teil des Eiweißes darstellt (vgl. Abschnitt 3). Sie ist tyrosinfrei, und ist verhältnismäßig sehr resistent, auch gegen die Einwirkung anderer Fermente, der Trypsins und Erepsins. Die Heteroalbumose ist in Wasser unlöslich; in verdünnten Salzlösungen ist sie löslich, aber bisweilen verliert sie auch diese Löslichkeit, und scheidet sich spontan aus. Diese Ausscheidung ist Dysalbumose, Antialbumingerinnsel oder Plastein genannt worden. Durch wirksames Pepsin gehen diese Körper wieder in Lösung, und die Abscheidung hat nicht die Bedeutung, die man ihr gelegentlich zugeschrieben hat.

Bei Verdauung mit viel Säure und wirksamem Pepsin gehen Eiweiß und Albumosen rasch in Pepton über. Aus dem Gemenge der Pepsinpeptone des Fibrins läßt sich, in schlechter Ausbeute, ein Individuum isolieren, dessen Analysen auf die Formel $C_{21}H_{34}N_6O_9$ führen. Doch muß die Formel vervielfacht werden. Bei der Spaltung liefert es Tyrosin, Tryptophan Arginin, Lysin, Asparagin- und Glutaminsäure. Ein entsprechendes Pepton aus Leim ist besonders reich an Glykokoll.

Aus den Histonen entsteht ein zu den Deuteroalbumosen gehöriger Körper, das Histopepton, das sich durch seine Fällbarkeit durch Natriumpikrat bei neutraler Reaktion auszeichnet, und sehr reich an Arginin und Lysin ist.

Aus dem Elastin entsteht durch Pepsinverdauung eine Albumose, das Hemielastin, das durch Aufkochen seiner wässerigen neutralen Lösung ausgefällt wird, um sich beim Erkalten wieder aufzulösen. Da diese „Hemielastinreaktion" keinem anderen Eiweißkörper zukommt, ist sie verwendet worden, um einen „gezeichneten" Eiweißkörper durch den Organismus zu verfolgen.

Durch die Einwirkung von verdünnten Säuren, $^1/_{10}$ bis $^1/_4$ n-HCl oder H_2SO_4, entstehen im allgemeinen dieselben Albumosen und Peptone wie durch Pepsin-Salzsäure. Nur ist die Wirkung langsamer und geht bei längerer Einwirkung bisweilen weiter.

Durch mehrwöchentliche Einwirkung von 12 bis 17 prozentiger HCl bei Körpertemperatur entstehen aus Eiweiß und Peptonen stark basische Komplexe, die sogenannten Kyrine,

Digitized by Google

die durch Phosphorwolframsäure fällbar sind. Ihre Analyse führt auf die Formel $C_{22}H_{47}N_9O_8$ (Caseinokyrin) oder ähnliche. Bei der Spaltung durch siedende Säuren entstehen hauptsächlich Arginin und Lysin, beim Globinokyrin auch Histidin, daneben wenig Glutaminsäure und Glykokoll. Die Phosphorwolframat-Peptone sind im Gegensatz zu den anderen Peptonen kristallinisch.

Durch Einwirkung von 70 prozentiger Schwefelsäure bei Zimmertemperatur entstehen aus Fibrin, Edestin unter anderen Eiweißen Di- und Tripeptide.

Aus den Protaminen entstehen durch Kochen mit Schwefelsäure von 10% in ½ bis 3 Stunden die sogenannten Protone, die auch kristallinische Derivate liefern. Beim Clupein sind diese Protone in ihrem Bau aufgeklärt, und als Diarginylvalin, Diarginylprolin usw. erkannt.

Durch verdünntes (½ n) Alkali, durch überhitzten Wasserdampf oder durch Papayotin entstehen Albumosen, die den Pepsinalbumosen ähneln. Die Protone, die durch Alkali aus den Protaminen entstehen, enthalten statt des Arginins Ornithin, da der Harnstoff intraprotein abgespalten ist.

Durch Trypsin entstehen Albumosen nur ganz vorübergehend, ein großer Teil der Eiweiß zerfällt in Aminosäuren, der ungespaltene Rest wird als Antipepton bezeichnet. Aus dem Antipeptongemenge lassen sich Individuen isolieren, deren Analysen auf die Formel $C_{10}H_{17}N_3O_5$ führen. Sie enthalten Lysin, Arginin, Glykokoll und verschiedene andere Aminosäuren, kein Tyrosin und Tryptophan. Durch Trypsineinwirkung auf die Pepsinpeptone entsteht neben Aminosäuren Antipepton, durch Einwirkung von Säuren auf Antipepton entstehen Kyrine. Nach langer Trypsinwirkung bleiben Antipeptone zurück, die einen erheblichen Teil der Eiweiße ausmachen, aber nur noch eine sehr schwache Biuretreaktion geben.

Vorkommen von Albumosen und Peptonen. Im Mageninhalt findet man alle Pepsinalbumosen, daneben relativ wenig Peptone; in dem Chymus, der in den Darm übertritt, findet man überwiegend Peptone, neben denen dann in steigendem Maße Aminosäuren auftreten. Am Ende des Dünndarmes findet man kaum noch Peptone. Dagegen enthält für gewöhnlich kein Teil des menschlichen oder tierischen Organismus, mit Ausnahme des Verdauungstraktus, nachweisbare Mengen von Albumosen oder Pepton.

Unter pathologischen Umständen, bei Eiterungen, bei der Einschmelzung und Resorption von Exsudaten und ähnlichen Prozessen kommt es zur Bildung von Albumosen im Innern des tierischen Organismus. Durch autolytische Vorgänge werden sie postmortal gelegentlich schnell und reichlich gebildet, z. B. bei der Phosphorvergiftung. Ferner hat sich eine Beziehung von im Blut kreisenden Albumosen zum Fieber ergeben; ebenso sind im Sputum Albumosen beobachtet worden. Bei allen diesen Prozessen wurden nun stets auch Albumosen im Harn gefunden, dagegen niemals Pepton. Was den Nachweis der Albumosen im Harn anlangt, so können dadurch Irrtümer entstehen, daß das Urobilin mit Natronlauge und Kupfersulfat eine Färbung gibt, welche von der der Biuretreaktion nicht zu unterscheiden ist.

Im Fleischextrakt finden sich häufig Leim-Albumosen, die aus dem Bindegewebe des Fleisches stammen.

Im Harn ist ein Körper enthalten, der in mancher Beziehung an die Albumosen erinnert, in anderer Hinsicht an das besonders resistente Antipepton, das eine schwache Biuretreaktion gibt. Er wird Oxyproteinsäure genannt. Die Analysen führen auf eine Formel $C_{43}H_{82}N_{14}O_{31}S$. Bei der Säurehydrolyse liefert sie viel Glykokoll und kleinere Mengen von anderen Aminosäuren. Sie gibt die Millonsche, aber nicht die Biuretreaktion. Aus der Oxyproteinsäure stammt ein Teil des Glykokolls, das man in menschlichem Harn findet. Menschlicher Harn enthält 3 bis 4 g pro Tag oder mehr. 4 bis 5% des Gesamtstickstoffs und eine gewisse Menge des unoxydierten Schwefels kommen auf sie. Auch der Hundeharn ist reich daran.

Bei der Seeschnecke Tritonium nodosum findet sich in den Speicheldrüsen neben Asparaginsäure ein Körper, der nach seinen Reaktionen ein Pepton ist.

Aus ungekeimten Pflanzensamen (von Lupinus luteus) läßt sich in einer Menge von 100 g auf 80 kg Samen ein Pepton gewinnen, das in seinen Eigenschaften mit den Pepsinpeptonen übereinstimmt. Bei der Säurespaltung konnten Lysin, Arginin und Glutaminsäure isoliert werden. Tierkohle absorbiert dies Pepton.

Ferner kann man aus den Samen nahezu aller Kulturgewächse, Getreidearten, Leguminosen und Oelsamen, neben den nativen Eiweißkörpern kleinere, selten etwas größere Mengen von Albumosen isolieren, die etwa die Eigenschaften der Pepsinalbumosen haben. Ob dieselben in den lebenden Samen präformiert sind, ist fraglich, da die Samen für die spätere Keimung proteolytische Fermente enthalten, die während der Extraktion die Eiweißkörper angreifen können.

In den Nährlösungen, in denen Bakterien wachsen, finden sich in der Regel Albumosen, und bei pathogenen Bakterien haftet an solchen „Toxalbumosen" bisweilen die Giftwirkung der Bakterien. Doch können

Digitized by Google

auch die gewöhnlichen Albumosen, wie sie etwa zur Herstellung des Nährbodens dienen, Fieber hervorrufen.

9. Eiweißsalze. 9a) Elektrolytischer Charakter. Hydrolytische Dissociation. Wie im Abschnitt 3 auseinandergesetzt wurde, sind die Eiweißkörper Aminosäuren. Wie diese sind sie daher „amphotere Elektrolyte". Die gleichzeitige Anwesenheit der NH_2- und der COOH-Gruppe in einem Molekül schwächt beide so weit ab, daß die Aminosäuren und die Eiweißkörper sehr schwache Basen und sehr schwache Säuren sind. Als Base ist das Eiereiweiß nur 500 mal stärker als Wasser, und 34 mal schwächer als Anilin. Ein Teil der Eiweißkörper kann allerdings auch stärker sauer oder basisch sein, ohne darum aufzuhören, amphoterer Elektrolyt zu sein.

Als sehr schwache Säuren und Basen bilden die Eiweißkörper Salze, die weitgehend hydrolytisch sind. In Abwesenheit von Säuren und Basen sind sie neutrale Stoffe, die nur wenige Ionen enthalten, den elektrischen Strom kaum leiten und wenig reaktionsfähig sind. Bei Gegenwart einer starken Säure, etwa Salzsäure wird diese durch Hydrolyse frei, die Lösung reagiert stark sauer und verhält sich wie ein Gemenge von Salzsäure und Salz. Bei Gegenwart einer starken Base reagiert die Lösung umgekehrt alkalisch, und enthält reichlich OH-Ionen.

Es liegt im Wesen der Hydrolyse, daß sie, auch abgesehen von der Temperatur, nicht konstant ist, sondern sie schwankt mit der absoluten und der relativen Menge beider Komponenten. Sie hängt bei dem salzsauren Eiweiß ab 1. von der Konzentration, 2. von dem Ueberschuß der Salzsäure. Mit steigender Konzentration nimmt die Hydrolyse ab, so daß verdünnte Lösungen mehr freie Salzsäure und weniger salzsaures Eiweiß enthalten als konzentrierte. Viel wirksamer ist ein Ueberschuß von Salzsäure, der die Hydrolyse verringert; bei starkem Salzsäureüberschuß ist die hydrolytische Dissoziation fast Null, während 80 bis 90% hydrolysiert sind, wenn Säure und Eiweiß in äquivalenten Lösungen vorhanden sind. Umgekehrt bindet im Casein-Natrium 1 g Casein bei starkem Ueberschuß von Alkali 180.10^{-5} g-Mol (0,1 g) KOH, bei dem auf Lackmus neutralen Punkt 51.10^{-5} g-Mol (0,056 g) KOH, bei der geringsten Menge Alkali, die Casein in Lösung hält $11,4.10^{-5}$ g-Mol (0,006 g) KOH.

Abweichend von den Aminosäuren sind die Eiweißkörper vielsäurige Basen und vielbasische Säuren. Da sich unter den Aminosäuren zweibasische Säuren, Asparagin- und Glutaminsäure, und zweisäurige Basen, Ornithin und Lysin, befinden, so wäre es möglich, daß auf diesen die Polyvalenz der Eiweißkörper beruht. Es ist aber auch denkbar, daß wenigstens für die Baseneigenschaft auch die Peptidbindungen in Frage kommen; oder daß in dem Eiweißmolekül mehrere Peptidketten stecken, die also mehrere Enden haben. Jedenfalls ergeben sich durch die Polyvalenz Abweichungen von den bei den Aminosäuren ermittelten Gesetzmäßigkeiten, die noch nicht aufgeklärt sind.

Die hydrolytische Dissoziation bewirkt also, daß 1 g Eiweiß je nach der beiderseitigen Konzentration und der Natur der mit ihm zusammentretenden Basen und Säuren ganz verschiedene Mengen von ihnen neutralisiert, und diese Erscheinung hat dem Verständnis lange die größten Schwierigkeiten bereitet. Früher hat daher die Ansicht Vertreter gefunden, daß es sich bei der Reaktion von Eiweiß mit Säuren und Basen gar nicht um Salzbildung handele, sondern um einen „Verteilungsvorgang", um „Adsorption" und ähnliches. Für das Verhalten kolloidaler Metalle und anderer Kolloide zueinander und zu Kristalloiden gleicher oder entgegengesetzter elektrischer Ladung sind eine Reihe Gesetzmäßigkeiten ermittelt worden; die natürlichen Eiweißkörper sind Kolloide, und so konnte ein Teil dieser Gesetzmäßigkeiten auf die Eiweißkörper übertragen werden. Zwei Kolloide fällen sich oder flocken sich aus, können sich aber auch in Lösung halten (Schutzkolloid); Salze, die außerdem in der Lösung sind, können je nach den Bedingungen die Ausflockung herbeiführen oder hemmen.

Die auffälligste hierher gehörige Erscheinung ist die, daß bei den Eiweißfällungen in der Regel eine bestimmte optimale Beziehung zwischen dem Eiweiß und dem Fällungsmittel bestehen muß. Wenn man Natriumsulfat mit wechselnden Mengen Chlorbaryum vermischt, so fallen die gesamten einander äquivalenten Mengen aus, und das überschüssige Baryumsalz oder Sulfat bleibt in Lösung. Versetzt man aber Leim mit steigenden Mengen Gerbsäure, so kommt es nur bei einem ganz bestimmten Mengenverhältnis zur Bildung eines Niederschlages, sonst löst er sich ganz oder teilweise wieder auf. Es ist einigermaßen beliebig, ob man hier von der Bildung eines Albuminates sprechen will, das in Wasser unlöslich, im Ueberschuß der Gerbsäure und des Eiweiß löslich ist, oder ob man die Ausdrucksweise der Kolloidchemie anwendet. Doch findet man die Bedeutung der Mengenverhältnisse ganz ebenso bei den Peptonen, die keine Kolloide sind, und selbst bei Aminosäuren, so daß es richtiger erscheint, auch beim Eiweiß von Salzbildung zu sprechen.

Die hydrolytische Dissoziation ist bei der Untersuchung jeder eiweißhaltigen

Digitized by Google

Flüssigkeit zu berücksichtigen. Denn zwischen dem Wasser, den Säuren und Basen und dem Eiweiß besteht für die jeweilige Konzentration ein Gleichgewichtszustand, der verschoben wird, sobald sich einer der Faktoren ändert. Infolgedessen ist es unmöglich, die Azidität oder Basizität einer Eiweißlösung zu titrieren. Denn mit jedem Kubikzentimeter NaOH, den man zu einer salzsauren Eiweißlösung hinzusetzt, verringert sich der Salzsäureüberschuß, vermehrt sich daher die Dissoziation, bis schließlich nahezu alle Salzsäure vom Eiweiß abgespalten, also frei wird. Da jeder Zusatz den Gleichgewichtszustand verschiebt, darf man zur Basizitätsbestimmung des Eiweiß kinetische, d. h. Methoden, die auf der Entfernung oder dem Verbrauch einer der Komponenten beruhen, nicht anwenden. Nur durch physikalische Methoden (elektrische Leitfähigkeit, Gasketten u. a.) erhält man Aufschlüsse über das wirkliche Verhalten von Eiweiß, Säuren und Basen in Lösungen. Kinetische Methoden lassen sich nur unter Kontrolle der physikalischen anwenden. So gestattet die genauere Kenntnis der Indikatoren, die man neuerdings besitzt, auch deren Verwendung, also die Titration. Die Unterschiede der Indikatoren sind bedeutend: nach Robertson müssen zu 100 ccm einer 8 proz. Lösung von Natriumcaseinat, die auf Lackmus neutral ist, 24 ccm $^1/_{10}$ n-Alkali hinzugefügt werden, um sie neutral gegen Phenolphtalein, und 66 ccm $^1/_{10}$ n-Säure, um sie für Kongo sauer zu machen. Von der Differenz der Indikatoren macht man Gebrauch bei der Aziditätsbestimmung im Mageninhalt, der salzsaures Eiweiß und salzsaure Albumosen neben überschüssiger Salzsäure enthält: bei der Titration mit Phenolphtalein ergibt die Titration die volle Azidität der vorhandenen Salzsäure, gleich als wäre das basische Eiweiß gar nicht vorhanden, die sogenannte Gesamtazidität. Bei der Titrierung mit bestimmten Indikatoren „für freie Salzsäure“, Phloroglucinvanillin, Tropäolin, Kongorot, Methylviolett u. a., die für H-Ionen relativ unempfindlich sind, erhält man Werte, die der Ionenkonzentration, also der hydrolytisch abgespaltenen Salzsäure ziemlich genau entsprechen.

Die hydrolytische Dissoziation der Eiweißsalze spielt eine wichtige Rolle bei der Aufrechterhaltung der neutralen Reaktion der Körperflüssigkeiten und Gewebe. Durch die Eiweißkörper werden Säuren und Basen im Blut und im Protoplasma neutralisiert, andererseits können sie aber jederzeit, wenn die Konzentration sinkt, wieder abgespalten werden. Die Eiweißkörper konkurrieren hierin mit den Carbonaten und Phosphaten. Nach Robertson wird durch Zusatz von 22,5 ccm $^1/_{100}$ n-Salzsäure zu 100 ccm einer 8 prozentigen Lösung des Serumeiweiß die Konzentration der Wasserstoffionen nur von $0{,}37 . 10^{-7}$ auf $1{,}0 . 10^{-7}$ gesteigert.

Eine Folge der hydrolytischen Dissoziation ist auch das Verhalten der Eiweißkörper zu den Alkaloidreagenzien. Diese bilden mit Eiweiß unlösliche Salze; bei mangelndem Säureüberschuß aber werden diese hydrolysiert und bleiben daher in Lösung. So schwache Basen wie die Eiweißkörper erfordern infolgedessen einen gewissen Säureüberschuß, um durch Phosphorwolframsäure usw. ausgefällt zu werden. Neutrale phosphorwolframsaure, pikrinsaure, gerbsaure Salze, Ferrocyankalium usw. fällen kein Eiweiß, sie tun es nur bei saurer Reaktion. Entsprechend verhalten sich Nuclein- und Taurocholsäure. Nur die stets basischen Protamine werden bei alkalischer, die ebenfalls basischen Histone und Histopeptone bei neutraler Reaktion gefällt.

Auch in festem Zustande, als „Bodenkörper“, reagieren die Eiweißkörper mit Säuren und Basen. Eine in Salzsäure schwimmende Fibrinflocke oder ein Stück koaguliertes Eiereiweiß beladen sich mit Salzsäure, und können sie so der Lösung zum großen Teil entziehen. Die festen Salze stehen ebenfalls im Wechselwirkung mit der über ihnen befindlichen Lösung, sie spalten also ebenfalls durch Hydrolyse Säuren oder Basen ab. So zersetzen sich einmal gebildete Niederschläge von Alkaloidreagenzien ohne genügenden Säureüberschuß; ein durch Phosphorwolframsäure hervorgerufener Niederschlag löst sich wieder auf, wenn er anhaltend mit Wasser gewaschen wird, verträgt aber Waschen mit Schwefelsäure. Andererseits lassen sich beigemengte Säuren, Basen und Salze aus Eiweißniederschlägen herauswaschen. Die dem Eiweiß beigemengten Körper befinden sich in chemischer, wenn auch durch Hydrolyse zu lockernder Verbindung mit ihm, und das erklärt die Schwierigkeit ihrer Entfernung.

Neben den bisher geschilderten Salzen sind nun noch andere beschrieben worden, bei denen die Säure oder Base in viel kleinerer Menge vorhanden ist, dafür aber nicht so leicht abgespalten werden kann. Dahin gehören die Chloride, Dichloride, Sulfate, Nitrate, Natron- und Kalisalze des Edestins, in denen das Aequivalentgewicht des Eiweiß 14 300 bis 7000 beträgt, und aus denen die Säure oder Base auch durch starke Verdünnung und langes Waschen schwer zu entfernen ist. Beim Casein ergibt sich ein Aequivalentgewicht von 5000 bis 9000, beim Nucleohiston von 6000 usw. Diese Zahlen sind etwa 50 mal so groß als bei den bisher besprochenen Eiweißsalzen. Auf Lackmus reagieren diese Salze in der Regel neutral.

Digitized by Google

Bei diesen Salzen kann es sich um zweierlei handeln. Entweder ist die gefundene geringe Menge von Säure oder Base nur der letzte Rest, der auch bei starker Hydrolyse noch nicht abgespalten ist, und die relative Konstanz der Werte erklärt sich nur aus der durch die Löslichkeit usw. gegebenen gleichmäßigen Behandlung. Oder die sauren und basischen Gruppen des Eiweiß zeigen Differenzen: eine unter ihnen bildet stabile Salze, während die anderen der geschilderten weitgehenden Hydrolyse unterliegen. Bei dem Casein und Nucleohiston, die Phosphor- und Nucleinsäure enthalten, liegt die letztere Vermutung besonders nahe; aber auch beim Edestin lassen Erfahrungen über den konstanten Säuregehalt der Kristalle eine wirklich feste Bindung wahrscheinlich erscheinen.

Die Fähigkeit, mit Säuren und Basen als Kation und Anion Verbindungen eingehen zu können, kommt allen Eiweißkörpern und ihren eiweißähnlichen Derivaten ohne Ausnahme zu, wie bei den Aminosäuren kann aber der saure oder basische Charakter in einem Eiweiß überwiegen. So sind die Phosphoproteide und Mucine ausgesprochene Säuren, die durch Säuren gefällt werden, sich in Alkalien sehr leicht lösen, Kohlensäure austreiben und Lackmuspapier röten. Dasselbe gilt in schwächerem Maße von dem Globulin und wieder sehr deutlich von den Nucleoproteiden, die als Paarling die Nucleinsäure, eine ziemlich starke Säure, enthalten. Die Albumine scheinen neutral zu sein. Dagegen sind die Histone basische Körper, die durch Alkalien gefällt werden und sich in Säuren lösen; noch stärker basisch sind die in ihrem Bau abweichenden Protamine; beide bilden als Salze der Nucleinsäure manche Nucleoproteide. Die Albumosen enthalten sowohl saure wie basische Substanzen, ihr Gemenge reagiert in der Regel auf Lackmus schwach alkalisch. Sie Siegfriedschen Peptone sind kräftige Säuren, aus ihnen geht durch Säurespaltung das Kyrin, eine starke Base, hervor.

9b) Eiweißkörper und Neutralsalze. Wenn man Eiweißkörper in einer Lösung von elektrisch neutralen Salzen auflöst, so ist die Ionenkonzentration geringer, als sie in der Salzlösung ohne Eiweiß sein würde. Das Eiweiß geht also mit dem Salz oder dessen Ionen eine Verbindung ein. In verdünnten Lösungen von Chlornatrium und ähnlichen Salzen sind die Eiweißkörper in der Regel löslicher als in reinem Wasser, was sich in einer Verminderung der inneren Reibung kundgibt. In konzentrierten Salzlösungen nimmt die Löslichkeit wieder ab, doch handelt es sich hierbei um etwas ganz anderes (vgl. Abschnitt 11). Die Verbindung der Eiweißkörper mit Salzen spielt bei drei Erscheinungen eine Rolle:

1. Bestimmte Eiweißkörper, die Globuline und die Heteroalbumose, sind überhaupt nur in Salzlösungen löslich, nicht in reinem Wasser. Sie werden nicht nur durch Verminderung des Salzes, auch durch bloße Verdünnung gefällt. Näheres bei den Globulinen (spezieller Teil).

2. Wenn man Eiweiß in Gegenwart alkohollöslicher Salze ($CaCl_2$, $SrCl_2$) aus wässeriger Lösung mit Alkohol fällt, so werden diese alkohollöslichen Salze mitgefällt, und lassen sich auch durch wiederholtes Lösen und Fällen und durch Waschen mit viel Alkohol immer nur zum Teil entfernen. Hierauf beruht zum großen Teil der Aschegehalt der aus den Körperflüssigkeiten und Geweben dargestellten Eiweißkörper oder der Albumosen und Peptone der Pepsinverdauung. Eiereiweiß bindet 16% seines Gewichts an Chlorcalcium; durch wiederholtes Umfällen läßt sich diese Menge auf 8 bis 12% herabdrücken.

3. Beim Zusammenbringen von Eiweiß und Schwermetallsalzen ($CuSO_4$, $AgNO_3$) in wässeriger Lösung entsteht bei bestimmten Mengenverhältnissen ein Niederschlag, der Eiweiß, Metall und Säure enthält. Bei anderen Mengenverhältnissen besteht zwar auch eine Verbindung des Eiweiß mit dem Salz, aber sie bleibt gelöst. Bei einem Ueberschuß von Kupfersulfat, aber auch von Eiweiß, bildet sich kein Niederschlag. Der Transport von Schwermetallen durch die eiweißhaltigen Körperflüssigkeiten erklärt sich hierdurch; andererseits ist in Gegenwart von Eiweiß nicht das vielleicht giftige Metall-Ion enthalten; Eiweiß kann so auch entgiften. Die Niederschläge von Eiweiß mit Kupfersulfat enthalten bis zu 30% Kupfer.

Die Art dieser Verbindungen von Eiweiß und Salzen ist bisher nicht aufgeklärt. Am wahrscheinlichsten ist es, daß gleichzeitig die sauren und basischen Aequivalente des Eiweiß mit Basen und Säuren Salze bilden; andererseits ist aber auch eine „molekulare Verbindung" von der Art komplexer Doppelsalze mit dem nicht ionisierten Teil des Salzes möglich. Die Base und die Säure des Salzes sind immer in ziemlich genau äquivalentem Verhältnis gebunden, beide lassen sich in gleicher Weise abspalten.

Da in den Geweben und Flüssigkeiten der Pflanzen und Tiere neben dem Eiweiß immer Salze vorkommen, so müssen sich in ihnen die hier besprochenen Verbindungen bilden; die Wichtigkeit ihres ständigen Vorhandenseins für die Reaktionsfähigkeit des Eiweiß wird vielfach betont.

9c) Die einzelnen Salze. Die Chloride und Sulfate aller Eiweißkörper sind in Wasser viel löslicher als die reinen Eiweißkörper; im Gegensatz zu den meisten neutralen Eiweißen auch in ziemlich starkem Alkohol,

Digitized by Google

die salzsauren Peptone auch in absolutem Methylalkohol und Aethylalkohol und Eisessig. Das kristallisierte Serumalbumin ist das Sulfat des Eiweiß, das kristallisierte Eieralbumin das Acetat. Die Magenverdauung bildet salzsaure Albumosen und Peptone, deren Hydrolyse die komplizierten Aciditätsverhältnisse des Mageninhalts bedingt. Die sauren Eiweißkörper, Mucin, Carcin, Phosphoproteide sind im Organismus als Natrium- und Calciumsalze vorhanden.

9d) Salze der Eiweißkörper mit Anilinfarben. Die meisten der in der Mikroskopie gebräuchlichen Farben bilden mit den Eiweißkörpern der Gewebe gefärbte Salze. Sie können sich in Lösung bilden, ebensogut aber an festem, suspendiertem Eiweiß oder an mikroskopischen Schnitten, wobei es ebensogut eine Neutralisation gibt, als wenn unlösliches Silberoxyd durch Salzsäure zu unlöslichem Silberchlorid neutralisiert wird. Auch hier spielt wieder die Doppelnatur der Eiweißkörper eine Rolle, indem sie als Säuren mit Farbbasen, als Basen mit Farbsäuren reagieren. Den besten Beweis bilden die Fälle, in denen die Salze anders gefärbt sind als die freien Basen oder Säuren. So sind die Salze der Nilblaubase blau, die freie Base dagegen rot; bringt man nun die rote Base mit einer Eiweißlösung zusammen, so bildet sich eiweißsaures Nilblau, die Flüssigkeit wird blau, gerade so gut, als ob man die Lösung der Nilblaubase angesäuert hätte. Ein Beispiel für die umgekehrte Reaktion ist das Kongorot. Hier ist die freie Kongosäure blau, wird aber sofort rot, wenn Eiweiß hinzugefügt wird. Festes Eiweiß, z. B. mikroskopische Schnitte, färbt sich durch Kongosäure rot, während die Lösung die überschüssige blaugefärbte Säure enthält.

Selbstverständlich sind auch hier die Gesetze der hydrolytischen Dissoziation maßgebend. Die sauren Farbstoffe wirken gut nur in saurer Lösung. Denn in neutraler Lösung hydrolysiert das gebildete farbsaure Eiweiß, und je nach der Stärke der Farbsäure kommt gar keine oder nur eine unbedeutende Färbung zustande. Säureüberschuß drängt die Hydrolyse zurück, stellt so das Salz wieder her und läßt die Salzfarbe erscheinen. Auch hier ist das Verhalten einer Eiweißlösung zu Kongorot ein deutliches Beispiel: eine Lösung von kongosaurem Eiweiß zeigt die hellrote Salzfarbe sogar, wenn die Lösung durch Essigsäure oder Salzsäure deutlich sauer ist. In einer roten alkalischen Nilblaulösung sind Eiweißflocken umgekehrt blau gefärbt. Ein Teil der Anilinfarben, hauptsächlich der sauren, bildet außerdem mit Eiweiß unlösliche Salze und fällt daher Eiweißkörper wie die Alkaloidreagentien. Die starke Färbung dieser Niederschläge macht sie leicht kenntlich und die Proben daher sehr empfindlich.

Ein beträchtlicher Teil der Farbstoffe, die zu mikroskopischen Färbungen verwendet werden, sind Kolloide und so gelten auch für ihre Reaktionen mit den Eiweißkörpern die komplizierteren Beziehungen, die oben etwa für Eiweiß und Gerbsäure beschrieben worden sind.

Nun ist oben schon von den chemischen Differenzen der Eiweißkörper die Rede gewesen. Da sie alle Basen und Säuren sind, müssen sie alle mit jedem dieser Farbstoffe ein gefärbtes Salz bilden, und man sieht ja auch in der Tat bei den meisten Färbungen die Gewebe sich zunächst diffus färben. Aber diese Färbung ist nicht gleichmäßig beständig. Angenommen die Färbung durch einen basischen Farbstoff, so werden beim Auswaschen die Salze der schwach sauren, mehr basischen Eiweißkörper stärker hydrolysiert als die der ausgesprochenen Säuren, sie geben ihren Farbstoff leicht ab, während ihn bei der gleichen Verdünnung die sauren Eiweiße festhalten. Versetzt man in Alkohol suspendierte Flocken von neutralem Eieralbumin und saurem Casein gleichzeitig mit Kongo und mit Nilblau, macht abwechselnd sauer und alkalisch und spült dann gut aus, so ist das Casein durch Nilblau blau, das Albumin durch Kongo rot gefärbt. Durch die Fixierung werden die Eiweißkörper der Gewebe koaguliert, aber ihr chemischer Charakter wird dadurch nicht geändert.

Die durch basische Anilinfarben leicht färbbaren Gewebe sind nach Heidenhain die Kerne, die Schleimsubstanzen, Knorpel, Amyloid und die Dotterbestandteile: sie enthalten in den Nucleoproteiden, Nucleinsäuren, Mucinen, Mucoiden und Vitellinen ausgesprochene Säuren.

Unterstützt wird die elektive Färbbarkeit der Gewebe durch den Kolloidcharakter der Eiweißkörper und der Farben. Zur Bildung einer festen Verbindung kommt es infolgedessen nur bei bestimmten Mengenverhältnissen; die mikroskopische Technik pflegt ja sehr ins einzelne gehende Vorschriften zu machen. Unterstützt wird die elektive Färbbarkeit ferner durch die Fixierung der Gewebe durch Säuren oder durch Formaldehyd, das die amphoteren Elektrolyte in Säuren verwandelt.

10. Halogeneiweiße und Verwandtes. Infolge Eintritts von Fluor, Chlor, Brom oder Jod in einige ringförmige Bausteine lassen sich die Eiweißkörper halogenieren, und solche Halogeneiweiße kommen auch in der Natur vor. Die Halogeneiweiße verhalten sich wie die halogensubstituierten Benzole, sie enthalten kein Halogen-Ion, sondern gestatten den Nachweis des Halogens erst nach erfolgter Veraschung.

Digitized by Google

10a) Jodeiweiße. Läßt man ein Gemenge von jodsaurem Kalium und Jodkalium unter Vermeidung saurer Reaktion auf Eiweiß wirken, so werden in dem Tyrosin, Tryptophan und Histidin mehrere Wasserstoffatome durch Jod substituiert. Ganz entsprechend lassen sich die isolierten Aminosäuren substituieren, und es sind aus ihnen jodierte Peptide aufgebaut worden.

Die gebildeten Jodeiweiße sind braune, lockere Pulver, die in Wasser, Alkohol und Säuren nicht löslich sind, sehr leicht dagegen sich in Alkalien, Ammoniak oder kohlensauren Alkalien lösen und aus diesen ihren Lösungen durch Säuren gefällt werden, um sich im Ueberschusse wieder zu lösen. Sie geben die Fällungsreaktionen der übrigen Eiweißkörper, von den Farbenreaktionen die Biuretreaktion, die Molischsche Reaktion und die Xanthoproteinreaktion, nicht aber die Reaktionen von Millon und Adamkiewicz, auch nicht die Schwefelbleireaktion. In ihrer prozentischen Zusammensetzung zeigen sie, wenn man das Jod abzieht, keine bedeutenden Differenzen gegen den betreffenden unveränderten Eiweißkörper; der Schwefelgehalt bleibt unverändert. Das Jodcasein enthält noch Phosphor, das Jodhämoglobin noch Eisen; in ihm scheint auch das Hämatin jodiert zu sein.

Der Jodgehalt der Jodeiweiße wechselt. An einigermaßen reinen Eiweißkörpern liegen folgende Zahlen vor:

	%		
Serumalbumin	12		
Serumglobulin	13	bis	14
Hämoglobin	11	bis	12
Eieralbumin	8,93		
Eiereiweiß	7,1		"
Muskeleiweiß	10	bis	11
Muskeleiweiß	11		
Casein	7	bis	7,5
Casein	5,7	bis	8,7
Casein	11	bis	13
Leim	1,3	bis	2,0
Thyreoglobulin	6	bis	6,6
Nucleohiston	11,22		

Analysen des Jodeieralbumins führen auf die Formel

$$C_{227}H_{370}J_4N_{48}S_2O_{75}.$$

Daneben existieren Körper mit viel höherem Jodgehalt, die das Halogen nur zum Teil in der gleichen festen Bindung enthalten, es vielmehr zum Teil sehr leicht abgeben. Dahin gehört das Perjodcasein mit einem Gehalt von 17,8% Jod. Auch die zu pharmazeutischen Zwecken fabrikmäßig hergestellten Jodeiweiße gehören überwiegend hierher.

Bei der Jodierung kommt es in der Regel auch noch zu einer teilweisen Spaltung des Eiweiß und anderen sekundären Veränderungen. Mit der biologischen Reaktion untersucht, zeigen jodierte Eiweiße keine Artverschiedenheit mehr.

Durch Trypsin und durch Erhitzen mit Säuren wird aus Dijodtyrosin das Jod ganz oder teilweise abgespalten, ebenso aus den Jodeiweißen. Daneben entstehen jodierte Peptone, aus Jodcasein z. B. das Caseojodin.

In der Natur kommen Jodeiweiße vor in der Schilddrüse und in den Skeletten von Anthozoen, Schwämmen und Korallen.

Das Thyreoglobulin der Schilddrüse enthält 1,75% Jod, d. h. weniger als die künstlichen Jodeiweiße. An diesem Jodeiweiß haftet die der Schilddrüse eigentümliche physiologische Wirkung. Doch scheint sie von dem Jodgehalt unabhängig zu sein. Bei der Trypsinverdauung des Thyreoglobulins wird Jod abgespalten. Ein dem Caseojodin vergleichbares Spaltungsprodukt des Thyreoglobulins ist das Jodothyrin, das direkt aus der Schilddrüse und durch Säurespaltung aus dem Thyreoglobulin dargestellt worden ist; es enthält 14,2% Jod, in Wasser und Säuren ist es unlöslich, in Alkalien dagegen löslich. Es besitzt noch die physiologische Wirksamkeit des Thyreoglobulins.

Ferner enthalten alle Anthozoenskelette Halogeneiweiße, und zwar meist Jod-, Brom- und Chloreiweiße nebeneinander. Die Chloreiweiße sind immer nur in kleiner, Brom- und Jodeiweiße dagegen bei den verschiedenen Arten in äußerst verschiedener Menge vorhanden; auch überwiegt bald das Jod-, bald das Bromeiweiß. In verschiedenen Exemplaren einer Art konnte kein Unterschied gefunden werden, so daß der Halogengehalt der Gerüste ein konstantes Artmerkmal ist. Es beträgt der Gehalt der organischen Gerüstsubstanz an

Chlor	weniger als 1%
Brom	Spuren bis zu 4,2%
Jod	Spuren bis zu 8%

Am genauesten untersucht ist das Gorgonin, das Jodeiweiß der Koralle Gorgonia Cavolinii. Durch Trypsin wird es unter Jodabspaltung verdaut, durch Alkali entsteht Dijodtyrosin. — Ebenso enthalten die Schwämme ein Jodeiweiß, aus dem sich durch Spaltung das Jodospongin darstellen läßt, das 9,01% Jod und 4,54% S enthält. Der ganze Badeschwamm enthält 1,5 bis 1,6% Jod, tropische Hornschwämme 8 bis 14%.

10b) Andere Halogeneiweiße. Ganz analog dem Jod lassen sich auch die anderen Halogene Brom, Chlor, und Fluor in das Eiweißmolekül einführen. Der Halogengehalt entspricht dem des Jodeiweiß. Für das Eiereiweiß wurde gefunden

6 bis 7%	Jod
4 bis 5%	Brom
2%	Chlor
1,2%	Fluor.

Digitized by Google

Eigenschaften und Löslichkeit sind die der Jodeiweiße. Neben diesen eigentlichen Bromeiweißen gibt es auch hier höher halogenierte Körper mit locker gebundenem Brom, die dem Perjodcasein entsprechen und 11 bis 17,6% Brom enthalten. Viele der technisch dargestellten Halogeneiweiße gehören in diese Gruppe.

10c) Nitrosubstitutionsprodukte. In analoger Weise wie durch Halogene werden Eiweißkörper durch Nitrogruppen substituiert. Aus dem Casein entsteht, wenn man der Salpetersäure Harnstoff hinzufügt und so das Auftreten von salpetriger Säure hintanhält, ein Nitrocasein. Ohne Harnstoffzusatz findet eine weitergehende Spaltung statt; es entsteht Xanthoprotein, daneben aber in reichlicher Menge Albumosen und Peptone, die meist auch nitriert sind. Vielleicht werden auch Aminosäuren gebildet. Das Xanthoprotein und die anderen Nitrosubstitutionsprodukte haben sauren Charakter und zeichnen sich vor allem durch ihre gelbe Farbe aus, die in Rotbraun übergeht, wenn man die Lösung alkalisch macht. Sie zeigen also die Farbe der Xanthoproteinreaktion, die auf der Bildung derartiger Körper beruht.

Auch das Clupein ist nitrierbar, indem das Arginin, aus dem es zum größten Teil besteht, nitriert wird.

10d) Oxydationsprodukte. Oxydiert man Eiweiß mit Permanganat in alkalischer Lösung, so wird ein je nach den Versuchsbedingungen größerer oder kleinerer Teil gespalten (vgl. Abschnitt 6) und es hinterbleibt ein ungespaltener, stark oxydierter Rest, die Oxyprotsulfonsäure; sie ist ein lockeres weißes Pulver von stark sauren Eigenschaften, in Wasser und Säuren unlöslich, in Alkalien leicht löslich. Durch fortgesetzte Oxydation lassen sich weitere Aminosäuren abspalten und eine stärker oxydierte Peroxyprotsäure erhalten.

Auch durch Wasserstoffsuperoxyd läßt sich Eiweiß oxydieren. Es entsteht das ebenfalls saure Oxyprotein. Durch Ozon wird das Eiweiß ebenfalls teilweise gespalten, teilweise oxydiert.

10e) Formaldehyd-Verbindungen. Methyleneiweiße. Wie den Aminosäuren, läßt sich auch den Eiweißkörpern durch Formaldehyd der basische Charakter nehmen; es resultieren Säuren, denen einige der charakteristischen Eigenschaften der Eiweißkörper fehlen, vor allem ihre Koagulierbarkeit. Andere Aldehyde haben eine ähnliche, wenn auch viel schwächere Wirkung.

Wenige Tropfen Formalin — 40% Formaldehyd — machen mehrere Kubikzentimeter einer kristallinischen Serumalbuminlösung ungerinnbar. Dabei verschwindet das Aldehyd zum Teil sofort, zum Teil erst allmählich; als Maximum wurden 43 Mol Aldehyd auf 100 Mol N des Eiweiß aufgenommen. Das gebildete Methyleneiweiß ist in Wasser und Salzlösungen löslich; es koaguliert beim Erhitzen nicht, wird durch Alkohol in salzfreiem Zustande gar nicht, in salzhaltigem schwer gefällt und gibt die meisten Eiweißreaktionen. Das durch Acetaldehyd entstandene Aethyleneiweiß ist in Säuren und Alkalien sehr leicht löslich, bei neutraler Reaktion unlöslich. Konzentrierte Eiweißlösungen werden von Formaldehyd in eine Gallerte verwandelt. Bemerkenswert ist, daß die Halogeneiweiße keinen Formaldehyd anlagern. Durch Pepsin sind die Methylen- usw. Eiweiße verdaulich.

10f) Andere Eiweißverbindungen. Silber-Eiweiß. Ferner verbindet sich Eiweiß auch mit Estern, Ketonen, mehrwertigen Alkoholen, wie dem Zucker, und aromatischen Alkoholen, wie dem Resorcin.

Auch Phosphorsäureester des Eieralbumins sind beschrieben, ebenso Diazoverbindungen des Eiweiß, die durch Einwirkung salpetriger Säure entstehen, ferner Verbindungen des Eiweiß mit Schwefelkohlenstoff, sowie Kombinationen dieser Einwirkungen mit der von Formaldehyd.

Eiweißlösungen werden durch Zusatz von metallischem Silber ungerinnbar, also denaturiert. Ebenso verhält sich Osmiumsäure. Die Eiweiße gehen mit Silber irgendwelche chemisch noch unbekannte Verbindungen ein. Bei der Osmiumsäure handelt es sich um etwas Aehnliches oder um die Bildung eines löslichen Salzes. Derartige Lösungen können erhitzt werden, ohne sich zu verändern; diese Eigenschaft der Gewebseiweiße kann vorteilhaft histologisch verwendet werden.

11. Die physikalischen Eigenschaften der Eiweißkörper. Die Angaben dieses Kapitels beziehen sich ausschließlich auf die in der Natur vorkommenden Eiweißkörper, in der Hauptsache auf die kolloidalen Eiweißkörper im engeren Sinne.

11a) Aussehen. Zusammensetzung. Molekulargewicht. In trockenem Zustande sind die Eiweißkörper weiße oder doch kaum gefärbte, lockere, voluminöse, nichthygroskopische Pulver. Einige Eiweißkörper sind in Kristallen bekannt, die Mehrzahl ist amorph. Sie sind teils in Wasser, teils nur in Salzlösungen, in verdünnten Säuren und Alkalien löslich, unlöslich dagegen in Alkohol, Aether, Chloroform, Benzol und allen übrigen sonst angewandten Lösungsmitteln. In stärkeren Alkalien und Säuren, sowie in Eisessig lösen sie sich unter Zersetzung auf. Beim Verbrennen hinterlassen sie einen charakteristischen Geruch „nach verbrannten Haaren“, bilden eine voluminöse, schwer verbrennliche Kohle und hinterlassen einen Aschenrück-

Digitized by Google

stand, der neben der Schwefelsäure, die aus dem Schwefel des Eiweiß hervorgeht, meist auch andere unorganische Elemente, Kalk, oft auch Phosphorsäure, enthält.

Die Analysen der Eiweißkörper sind wegen der Schwerverbrennlichkeit, dem Schwefel- und Aschegehalt nicht ganz einfach. und es ist schon bei der quantitativen Bestimmung der Spaltungsprodukte auf die große Schwierigkeit hingewiesen worden, einheitliche und reine Körper als Ausgangsmaterial zu gewinnen. Das Serumalbumin, das in vieler Hinsicht als Typus eines einfachen Eiweißkörpers angesehen werden kann, hat folgende prozentische Zusammensetzung:

C	53,08%
H	7,10%
N	15,93%
S	1,90%
O	21,99%

Es ist sehr bemerkenswert, wie wenig die anderen Eiweißkörper, trotzdem sie sich aus qualitativ und quantitativ so verschiedenen Aminosäuren zusammensetzen, in ihrer prozentischen Zusammensetzung hiervon abweichen. Der Kohlenstoffgehalt steigt beim Casein und Histon auf 54 und 54,97, und fällt bei anderen Eiweißen bis unter 52%; der Stickstoffgehalt steigt bei den Histonen auf über 18, bei den Pflanzenglobulinen und manchen Gerüsteiweißen auf über 19, und sinkt beim Eieralbumin, das indessen kein einfaches Eiweiß ist, auf 15%. Die Proteide, die anders zusammengesetzte Gruppen neben dem Eiweiß enthalten, zeigen natürlich etwas stärkere Abweichungen, ebenso die Protamine. Erheblicher differiert der Schwefelgehalt, der bei einigen schwefelreichen Albuminen auf über 2%, bei dem Keratin auf 4 bis 5% steigt, beim Hämoglobin auf 0,4% sinkt.

Die aus der prozentischen Zusammensetzung zu erwartende Molekularformel muß beim Serumalbumin mindestens verdoppelt werden, da das schwefelhaltige Spaltungsprodukt Cystin ist, das 2 Atome Schwefel enthält. Auf Grund der Erfahrungen bei der Jodierung berechnet Hofmeister sogar eine Formel mit 6 Atomen Schwefel

$$C_{450}H_{720}N_{116}S_6O_{140},$$

was einem Molekulargewicht von 10 166 entsprechen würde. Auf zwei ganz verschiedenen Wegen kann man eine Berechnung der Molekulargröße beim Hämoglobin vornehmen, was um so mehr ins Gewicht fällt, als man bei seiner leichten Kristallisierbarkeit von zweifellos reinem, einheitlichem Material ausgehen kann. Erstens kann man aus dem prozentischen Verhältnis des Eisens und Schwefels die mindeste Molekulargröße berechnen. Auf diese Weise berechnet sich für Hundehämoglobin die Formel:

$$C_{758}H_{1203}N_{195}O_{218}FeS_3$$

mit dem Molekulargewicht 16 669.

Eine zweite Bestimmungsmethode liefert das Bindungsvermögen des Hämoglobins für Sauerstoff und Kohlenoxyd, das sehr exakt bestimmt werden kann und aus dem sich da 1 Molekül Hämoglobin 1 Molekül Kohlenoxyd bindet, dasselbe Molekulargewicht wie aus den Prozentzahlen des Eisens berechnet. Das Molekulargewicht des Globins, des Eiweißanteils des Hämoglobins, kann freilich niedriger sein, da nicht bekannt ist, ob die Farbstoffkomponente, das Hämatin, mit einem oder mehreren Molekülen Globin verkoppelt ist. Doch ergeben auch die Verhältnisse der Spaltungsprodukte zueinander und die Aequivalentgewichte Zahlen dieser Größenanordnung.

Von den direkten Bestimmungsmethoden ist die Siedepunktserhöhung unanwendbar. Die Gefrierpunktserniedrigung und der osmotische Druck sind bestimmt worden. Doch beruhen die Werte wohl ausschließlich auf Salzbeimengungen und die Eiweißkörper haben als Kolloide gar keinen osmotischen Druck. Für die Peptone ergeben sich aus den Spaltungsprodukten Werte zwischen 200 und 1000, das komplizierteste synthetische Peptid hat ein Molekulargewicht von 1213.

11b) Verbrennungswärme. Die Verbrennungswärme beträgt für Serumalbumin 5917,8 cal., für Amandin 5543, für Glutin 5200 cal. Sie ist im allgemeinen proportional dem Kohlenstoff- und umgekehrt proportional dem Sauerstoffgehalt. Im Tierkörper liefern die Eiweiße eine geringere Verbrennungswärme, da der Stickstoff im Unterschied zu der Verbrennung in der Bombe nicht oxydiert wird.

11c) Optische Eigenschaften. Drehungsvermögen. Brechungskoëfficient. In wässeriger Lösung drehen die Eiweißkörper und Peptone die Ebene des polarisierten Lichtes nach links, und zwar verschieden stark, so daß man das Drehungsvermögen zur Charakterisierung der einzelnen Eiweiße zu verwerten gesucht hat. Die Eiweißkörper haben indessen wie die Aminosäuren die Eigenschaft, daß die Salze ein anderes Drehungsvermögen zeigen als die freien Körper, und daß wegen der hydrolytischen Dissoziation das Drehungsvermögen der Salze je nach der Konzentration des Eiweiß wie der Säure und Base wechselt. Da man sie wegen der eintretenden Zersetzung in starker Säure oder Lauge nicht untersuchen kann, sind nur die ganz wenigen Zahlen anwendbar, die in genau neutraler Lösung an wirklich reinen Eiweißen erhalten wurden. Dagegen sind einige Proteide,

Digitized by Google

das Hämoglobin und die Nucleoproteide, rechtsdrehend.

Der Brechungskoeffizient von Eiweißlösungen ist sehr hoch. Er ist mit dem Pulfrichschen Refraktometer für die Eiweißkörper des Blutserums, Casein, Ovomucoid und Ovovitellin bestimmt worden. Er ist so hoch, daß er zur Bestimmung der Eiweißmenge verwendet werden kann.

11d) Die kolloidalen Eigenschaften der Eiweißkörper. Präzipitine. Gelöst diffundieren die Eiweißkörper gar nicht durch tierische Blase und vegetabilisches Pergament, gehören also nach der Bezeichnung von Graham zu den kolloidalen Körpern. Von den echten Kolloiden, als deren Typus man die kolloidal gelösten Metalle und das oft untersuchte kolloidale Eisenoxydhydrat ansehen kann, unterscheiden sie sich indessen in einigen Punkten und bilden so einen Uebergang zu den Kristalloiden.

Die Eiweißkörper sind ultramikroskopisch sichtbar, und auch ihre Reaktionen mit den gleichfalls kolloidale Farbstoffen können so beobachtet werden. Bei der Spaltung des Eiweiß durch Fermente verschwindet die Sichtbarkeit.

Ferner werden alle Eiweißkörper bereits durch Schütteln ihrer Lösungen koaguliert und ausgefällt; anfangs, scheint es, noch in löslichem Zustande, nach kurzer Zeit aber tritt Denaturierung und dauerndes Unlöslichwerden ein. Fibrinogen und die Globuline werden dabei leichter koaguliert als die löslicheren Albumine. Fibrinogen und Globulin haben die Neigung, auf geringe, sonst chemisch indifferente Einflüsse, wie Wasserverdunstung, Berührung mit porösen Substanzen usw., unlöslich zu werden und sich in Form feinster, quellbarer Membranen und Partikelchen unlöslich auszuscheiden.

Ein Teil der Eiweißkörper, das Casein und andere Proteide, Fibrinogen, viele Gewebseiweiße usw. werden auch durch Oberflächenwirkung, durch Eintragen von gebranntem Ton oder Tierkohle in ihre Lösungen gefällt; derselbe Prozeß liegt vor, wenn man Milch durch Tonzellen saugt oder fein zerkleinerte Gewebe mit Kieselgur mischt und auspreßt; dann geht das Albumin zwar durch, Casein, Myosin usw. aber werden von dem porösen Ton gefällt und zurückgehalten. Auch das Hämoglobin filtriert nicht durch Tonzellen.

Mit dem kolloidalen Charakter der Eiweißkörper steht ihre Fähigkeit in Zusammenhang, an sich unlösliche Körper in Lösung zu halten. Auf diese Weise sind Lecithin und Kalkseifen im Serum, phosphorsaurer Kalk in der Milch gelöst. Vor allem aber bleiben so Eiweißkörper und Albumosen in eiweißhaltigen Flüssigkeiten gelöst, in denen sie an sich unlöslich sind, was ihre Trennung so außerordentlich erschwert. Doch können hierbei auch Salze oder andere Verbindungen der so sehr reaktionsfähigen Eiweißkörper eine Rolle spielen. Verwandt damit ist die Fähigkeit des Caseins und anderer Eiweiße, mit fein verteilten Fetttröpfchen haltbare Emulsionen zu bilden; bei der Ausfällung des Caseins fällt das gesamte emulgierte Fett mit aus. Eine genauere Kenntnis der physikalischen Verhältnisse, der Haptogenmembranen usw. in der Milch steht noch aus.

Diese kolloidalen Eigenschaften sind es, die den Eiweißkörpern wie keinem anderen Stoffe die Fähigkeit verleihen, Gewebe zu bilden und an dem Aufbau des Protoplasmas mit seiner eigentümlichen, halbflüssigen Struktur den wesentlichsten Anteil zu nehmen.

Das Gegenstück ist die Eigenschaft der Eiweißkörper, beim Ausfallen aus Lösungen oder bei sonstiger Berührung andere in der Lösung befindliche Stoffe durch eine Art Oberflächenattraktion mit sich niederzureißen oder auf sich niederzuschlagen. Auch hier spielen chemische, durch Hydrolyse zu lockernde Bindungen eine Rolle.

Eine Reaktion zwischen zwei Kolloiden sind die Ausflockungserscheinungen, die hier nicht näher behandelt werden sollen. Zum Ausfällen der Eiweiße bedient man sich dieser Ausflockungen durch Martite, Kaolin u. a.

Daß auch bei den Reaktionen des Eiweiß mit vielen Säuren, Basen und Salzen, wie den komplexen Alkaloidreagenzien, vielen Anilinfarben und den Schwermetallsalzen der kolloidale Charakter des Eiweiß in Rechnung gezogen werden muß, ist in Abschnitt 9 erwähnt.

Als nicht eigentlich gelöste Stoffe verleihen die Eiweißkörper ihren Lösungen einen hohen Grad von Viskosität oder innerer Reibung. Bei der Spaltung des Eiweiß nimmt sie ab, ebenso wenn die Löslichkeit des Eiweiß durch den Zusatz von Salzen erhöht wird. Beginnende Ausscheidung von Eiweiß läßt sie dagegen zunehmen. Doch soll auf die Anwendungen in der Biochemie nur verwiesen sein.

In Zusammenhang mit dem kolloidalen Charakter der Eiweißkörper steht ihre Fähigkeit, spezifische Präzipitine und andere Antikörper zu erzeugen wenn sie in die Blutbahn von Tieren eingeführt werden. Diese Präzipitine erzeugen in einer Lösung des Eiweiß, das als „Antigen" zur Einspritzung gedient hat, einen Niederschlag, der zum großen Teile aus Eiweiß besteht. Bei der Pepsin- und Trypsinspaltung des Eiweiß hört die Präzipitinbildung gleichzeitig mit dem Verschwinden des letzten kolloidalen Eiweiß auf. Ebenso verlieren Eiweißlösungen durch Aufkochen die Fähigkeit, Präzipitine hervorzurufen, und mit Präzipitinen zu reagieren. Erwärmen der Eiweißkörper auf den Koagulationspunkt (s. unten) hebt dagegen, wenn

Digitized by Google

es nicht zu einer Ausscheidung des Eiweiß kommt, beide Fähigkeiten nicht auf, setzt sie höchstens herab.

Alles Nähere über die „biologischen Reaktionen" siehe in den Artikeln „Blut" (S. 64) und „Immunität".

11e) Das Aussalzen der Eiweißkörper. Eiweißkristalle. Die Eiweißkörper werden durch viele unorganische Salze aus ihren Lösungen ausgeschieden. Dies Aussalzen wird als ein Verteilungsvorgang angesehen, bei dem sich das Eiweiß als feste Phase von der Salzlösung als flüssiger Phase sondert. Das Eiweiß scheidet sich als solches ab, und nicht als Verbindung mit dem Salz oder dem Wasser, die ihm nur mechanisch anhaften. Für die Eiweißchemie hat das Aussalzen dadurch eine ganz besondere Wichtigkeit erlangt, daß die Eiweißkörper beim Aussalzen nicht oder doch sehr viel langsamer denaturiert werden, als durch die anderen Fällungsmethoden, und daß die Unterschiede der einzelnen Eiweißkörper in der Aussalzbarkeit viel größer sind als in der sonstigen Fällbarkeit. Das Aussalzen hat daher die größten Dienste zur Reindarstellung der Eiweiße geleistet.

In bezug auf die aussalzende Fähigkeit der Salze bestehen gewisse Gesetzmäßigkeiten und Beziehungen zu anderen physikalisch-chemischen Eigenschaften der Salze, aber auch erhebliche Abweichungen. Die eiweißfällende Kraft mußte jedenfalls empirisch ermittelt werden. Eine erste Gruppe bilden das Natriumchlorid, -sulfat, -acetat und -nitrat, durch welche die leichtest aussalzbaren Eiweiße zum Teil schon vor der Sättigung ausgefällt werden. Wirksamer ist das Magnesiumsulfat, das eine scharfe Grenze zwischen den schwer und den leicht aussalzbaren Eiweißkörpern zu ziehen gestattet. Alsdann folgen Kaliumacetat, Calciumchlorid und Calciumnitrat, von denen die beiden letzteren indessen die Eiweiße rasch unlöslich machen; bei den Calciumsalzen und bei einem etwaigen Kalkgehalt anderer Salze liegen überhaupt Besonderheiten vor. Kaliumacetat und die beiden Kalksalze fällen alle nativen Eiweißkörper aus ihren Lösungen, dasselbe tun die Kombinationen von Natriumsulfat und Magnesiumsulfat, durch die auch die schwer fällbaren Albumine ausgesalzen werden, und Natriumsulfat bei 37°. Am wirksamsten endlich sind Ammoniumsulfat und Zinksulfat, die auch alle Spaltungsprodukte der Eiweiße, mit Ausnahme der echten Peptone, fällen und die in dieser Beziehung als universal zu betrachten sind.

Eine Reihe der gut ausfällenden Salze, wie Natriumchlorid und Magnesiumsulfat, haben die Eigenschaft, nicht nur, wenn ihre Lösungen ganz gesättigt sind, auszusalzen, sondern einen Teil der Eiweißkörper schon bei niederen Konzentrationen zum Ausfallen zu bringen. Ganz besonders gilt dies von zwei Salzen, dem Ammoniumsulfat und Zinksulfat, und die systematische Anwendung der fraktionierten Fällung mit diesen Salzen hat die Kristallisation der Albumine, die Reindarstellung vieler Eiweiße und die Aufklärung der Albumosenchemie ermöglicht. Es hat sich dabei ergeben, daß es für jeden Eiweißkörper eine Konzentration des fällenden Salzes gibt, bei der er sich auszuscheiden beginnt, und eine etwas höher gelegene, bei der die Ausfällung vollendet und nichts mehr in Lösung ist. Die Fällungsgrenzen für Ammonsulfat sind nach Hofmeister „ebenso charakteristisch für den Eiweißstoff wie etwa der Löslichkeitsgrad für einen kristallisierten Körper". Die Versuche werden meist so angestellt, daß in dem gleichen Volum die Menge zugesetzter konzentrierter Ammonsulfatlösung variiert wird. Die Fällungsgrenzen für ein Eiweiß sind 2,9 und 4,6, besagt demnach: wenn von 10 ccm 2,9 ccm kalt gesättigte Ammonsulfatlösung sind, beginnt das Eiweiß auszufallen; sind 4,6 ccm Ammonsulfatlösung, so ist die Fällung vollendet, ein weiterer Zusatz ändert nichts mehr.

Die Grenzen, die die Fraktionierung mit Ammonsulfat zwischen den einzelnen Eiweißkörpern zieht, fallen meist mit denen zusammen, die sich durch die anderen Salze ergeben, und die Gruppen mit dem gleichen Verhalten zu Salzen zeigen auch sonst gewöhnlich eine gewisse Uebereinstimmung. Es ergibt sich so eine erste Gruppe von kompliziert gebauten Eiweißen, Fibrinogen und manche Eiweißkörper des Zellprotoplasmas, die von Magnesiumsulfat und Natriumchlorid zum Teil schon vor der vollen Sättigung gefällt werden, und deren obere Fällungsgrenzen für Ammonsulfat nahe bei 3,0 liegen; die Eiweiße der zweiten Gruppe werden durch die anderen Salze erst bei völliger Sättigung ausgesalzen, besonders vollständig durch Magnesiumsulfat; die Fällungsgrenzen für Ammonsulfat liegen recht übereinstimmend etwa zwischen 2,7 und 4,6; es sind die tierischen Globuline verschiedenster Herkunft, die Mucine, außerdem gehören die primären Albumosen hierher. Die dritte Gruppe endlich, die Albumine, das Hämoglobin, werden durch die anderen Salze — mit Ausnahme etwa der Kombination Magnesium- + Natriumsulfat — nicht, durch Ammonsulfat und Zinksulfat erst bei nahezu voller Sättigung gefällt; ebenso verhalten sich die Deuteroalbumosen. Die Pflanzeneiweiße lassen sich weniger gut einordnen.

Die erneute Fraktionierung dieser Fraktionen ist versucht worden, hat aber wenig sichere Ergebnisse gezeitigt. Nur zur Isolierung eines etwa mit dem Eiweiß ausfallenden

Digitized by Google

Stoffes kann sie einmal praktisch brauchbar sein.

Diese Angaben beziehen sich nur auf das Aussalzen bei neutraler Reaktion. Bei saurer Reaktion sind die Fällungsgrenzen für Ammonsulfat und Zinksulfat ganz allgemein nach unten verschoben, d. h. die Fällung beginnt und endet immer schon bei geringerem Salzgehalt. Kochsalz scheidet bei saurer Reaktion alle nativen Eiweißkörper aus. Das bei saurer Reaktion ausgeschiedene Eiweiß ist nicht das freie Eiweiß, sondern sein Sulfat, so daß man auch sagen kann, die Salze des Eiweiß sind leichter auszuscheiden als das freie Eiweiß. Bei alkalischer Reaktion ist Eiweiß im Gegenteil schwerer auszusalzen.

Die Aussalzung durch Ammonsulfat scheidet manche Eiweißkörper kristallinisch ab, vor allem die Albumine. Der Niederschlag scheidet sich zunächst amorph ab, wird aber beim Stehen kristallinisch. Man kann ihn in wenig kaltem Wasser lösen und in der gleichen Weise wieder hervorrufen, auf diese Art das Albumin also umkristallisieren. Das Verfahren ist in den letzten Jahren für die Albumine, dann auch für das Hämocyanin, Hämoglobin und Phykoerythin häufig angewendet worden.

Diese Kristallisation weicht von anderen Kristallisationen ab; sie ist ein Aussalzungsvorgang. Es liegt im Wesen der Methode, daß die entstehenden Eiweißkristalle nicht rein sind, sondern Mutterlauge in erheblicher Menge enthalten. Zur Reindarstellung des Eiweiß löst man die Kristalle und dialysiert, wobei man das Ammonsulfat und andere Salze natürlich los wird, nicht aber die kolloidalen Verunreinigungen. Es bedarf eines drei- bis sechsmaligen Umkristallisierens, um diese zu entfernen. Dazu kommt eine zweite Eigenschaft dieser Eiweißkristalle, sich mit Farbstoffen, Salzen usw. zu beladen; die Kristalle saugen sich mit allen möglichen in Lösung befindlichen Stoffen voll „wie ein Schwamm". Es ist schon oben erwähnt, daß es sich dabei vermutlich nicht um mechanisches Mitreißen handelt, sondern um Salzbildungen der reaktionsfähigen Eiweiße mit diesen Körpern. So wichtig daher die Kristallisation der Albumine für die Auffassung der Eiweiße als einheitlicher chemischer Individuen und damit für die Eiweißchemie überhaupt geworden ist, so darf man doch nie vergessen, daß die Eiweißkörper einer sehr gründlichen Reinigung durch oftmaliges Umkristallisieren bedürfen.

Die Albuminkristalle gehören wahrscheinlich dem hexagonalen System an und sind mehr oder weniger stark, und zwar positiv doppelbrechend. Eieralbumin liefert überwiegend sechsseitige Säulen von 0,1 bis 0,15 mm Länge und 0,003 bis 0,021 mm Dicke, Serumalbumin und Milchalbumin verschiedene Kombinationen von Protoprisma und Protopyramide.

Die Kristallisation des Hämoglobins und mancher Pflanzeneiweiße, die beim Abkühlen ausfallen, unterscheidet sich im Gegensatz hierzu nicht von anderen Kristallisationen. Die Beimengung von anderen Kolloiden spielt aber auch hierbei eine Rolle.

IIf) Die Denaturierung der Eiweißkörper. Koagulation. Spaltung durch Säuren und Alkalien. Wie anderen Kolloiden kann dieser ihr Charakter den Eiweißkörpern leicht genommen werden. Dieser Vorgang ist irreversibel: man bezeichnet ihn als Denaturierung oder Koagulation. Es ist das Kennzeichen der nativen oder echten oder Eiweißkörper im engeren Sinne, daß sie durch Erhitzen ihrer Lösungen oder andere Prozesse koaguliert werden, und dann ohne weitergehende Spaltung und ohne Aenderung ihrer ursprünglichen Eigenschaften nicht mehr gelöst werden können, sondern dauernd denaturiert sind.

Die Salze des denaturierten Eiweiß mit Säuren werden Acidalbumin, die mit Basen Alkalialbuminat genannt.

Die englische physiologische Gesellschaft schlägt für die denaturierten Eiweiße den Namen Metaproteine vor, die amerikanischen physiologischen Chemiker wenden ihn ebenfalls an, oder benutzen den Ausdruck „Protean", wobei zu dem kolloidalen Edestin und Globulin das denaturierte Edestan und Globulan gehören.

α) Die Koagulation durch Erwärmen. Wenn man Eiweißkörper in wässeriger Lösung auf eine bestimmte Temperatur erwärmt, werden sie koaguliert. Das praktische Arbeiten mit eiweißhaltigen Flüssigkeiten erfordert eine eingehende Kenntnis dieses Prozesses.

Von Bedeutung für die Wärmekoagulation ist die Reaktion der Lösung und ihr Gehalt an Salzen, aber allerdings nur für die Erscheinungsform der Koagulation. Denn die Denaturierung der Eiweißkörper tritt durch Erhitzen bei jeder Reaktion mit und ohne Salze ein, aber die Schicksale des entstandenen denaturierten Eiweiß sind verschieden. Das denaturierte Eiweiß ist nämlich in Wasser und neutralen Salzlösungen unlöslich, löslich dagegen in Säuren und Alkalien. Erfolgt daher die Koagulation in salzfreier, aber schwach alkalischer Lösung, so bildet sich sofort ein lösliches Salz des denaturierten Eiweiß mit dem betreffenden Metall; erfolgt sie bei saurer Reaktion, so entsteht entsprechend das Salz des denaturierten Eiweiß mit Säure. Nur bei neutraler Reaktion fällt das als solches unlösliche denaturierte Eiweiß einfach aus, es kommt

Digitized by Google

zu einer wirklichen kompletten Koagulation. Der Zusatz eines Tropfens verdünnter Säure oder verdünnten Alkalis dagegen verhindert die Koagulation anscheinend vollständig; die Lösung bleibt beim Erhitzen klar.

Anders in salzhaltiger Lösung: Die Salze des denaturierten Eiweiß mit Salzsäure, Schwefelsäure, Essigsäure und andere sind in Wasser sehr leicht löslich, sie werden dagegen durch Salze gefällt, und zwar schon durch sehr geringe Mengen eines Salzes. Es besteht dabei eine Abhängigkeit von der Menge der Säure, indem bei einem kleinen Säureüberschuß die Fällung durch eine geringe Menge Salz erfolgt, bei einem größeren Ueberschusse dagegen viel mehr Salz erforderlich ist. Die Fällung der Säuresalze des denaturierten Eiweiß durch Salze tritt auch ein, wenn man erst erhitzt, und dann erst das Salz hinzusetzt. Dabei wird das Eiweiß indessen leicht weiter verwandelt. Die Art des Salzes scheint auf die Fällung des Acidalbumins keinen großen Einfluß zu haben, außer natürlich bei Salzen, die nicht neutral reagieren.

Für die praktische Ausführung der Koagulation folgt daraus, daß man ganz reines, durch gründliche Dialyse salz- und alkalifrei gemachtes Eiweiß ohne jeden Zusatz erhitzen muß. Die natürlichen Flüssigkeiten, Serum, Harn oder Gewebsextrakte, die ja immer kleine Mengen Salze enthalten, koaguliert man seit alters unter Zusatz einer sehr kleinen Menge von Essigsäure, so daß die Reaktion auf Lackmus eben schwach sauer ist. Bei Verwendung starker Säuren entsteht zu leicht ein Ueberschuß. Doch auch mit Essigsäure stößt man bei der Koagulation der Muskel- und anderer Organeiweiße auf kaum überwindbare Schwierigkeiten und es ist dann am bequemsten, der zu koagulierenden Flüssigkeit Chlornatrium oder ein anderes Neutralsalz zuzusetzen und dann einen Ueberschuß von Essigsäure anzuwenden. Die Nichtberücksichtigung der Tatsache, daß nur bei ganz vorsichtigem und genauem Innehalten einer eben wahrnehmbaren, sehr schwach sauren Reaktion oder bei einem reichlichen Salzgehalt der Lösung das Eiweiß durch Erhitzen gänzlich ausgefällt werden kann, hat zu bedenklichen Irrtümern geführt.

Beim Koagulieren einer natürlichen Eiweißlösung verschiebt sich die Reaktion nach der alkalischen Seite, so daß eine neutrale oder selbst schwach saure Lösung beim Kochen deutlich alkalisch wird. Der Grund ist vielleicht die Zersetzung der Karbonate. Bei den Pflanzenglobulinen kommt es bei längerem Sieden zu einer beträchtlichen Alkaleszenz, die nur auf einer Spaltung des Eiweiß beruhen kann.

Wieder anders liegen die Verhältnisse, wenn Eiweiß bei alkalischer Reaktion erhitzt wird, so daß das Eiweiß als Säure ein Salz mit einem Metall bildet. Ob auch dieses Salz durch Neutralsalze gefällt wird, scheint unsicher, jedenfalls ist dazu eine unvergleichlich viel größere Salzmenge erforderlich als bei saurer Reaktion. Mit den meisten Basen, Kali, Natron, Ammoniak, Lithion, auch organischen Basen, bildet das Eiweiß lösliche Salze. Dagegen besitzt das denaturierte Eiweiß ein schwer lösliches Kalksalz, das sich freilich in der Regel nicht glatt absetzt wie die Salzfällungen bei saurer Reaktion, sondern das eine trübe, mehr oder weniger haltbare Emulsion bildet. Nun enthalten alle tierischen und pflanzlichen Gewebe und Flüssigkeiten Kalk, ihre neutrale Reaktion verschiebt sich beim Erhitzen nach der alkalischen Seite, und so erhält man beim Erhitzen von Serum, von Gewebsextrakten usw. ohne Säurezusatz eine trübe opaleszente Lösung, bei größerer Konzentration eine Gallerte.

Durch nachträgliches Ansäuern einer solchen opaleszenten Flüssigkeit läßt sich das Eiweiß bisweilen klar ausfällen, bisweilen aber auch nicht; eine Enteiweißung durch Erhitzen bei alkalischer Reaktion ist daher niemals sicher ausführbar.

Ein sehr bekanntes Beispiel dieser opaleszenten Fällung ist das Festwerden des Weißen der Hühnereier, einer kalkhaltigen alkalischen konzentrierten Eiweißlösung, beim Erhitzen. Bei den Hühnereiern und den Eiern anderer Nestflüchter ist dies Eiweiß weiß und undurchsichtig; dagegen enthalten die Eier der meisten Nesthocker, so der Krähe, Schwalbe, des Kiebitz usw. das sogenannte Tataeiweiß, das beim Kochen zu einer glashellen, durchsichtigen Gallerte gerinnt. Die Erscheinung beruht auf dem verschiedenen Gehalte an Salzen und an Alkali, und auch das Weiße der Hühnereier erstarrt durchsichtig, wenn man die Eier 2 bis 3 Tage in 10-prozentige Kalilauge legt. Eine andere Anwendung des gallertig und durchsichtig erstarrten Eiweiß ist von Koch in die bakteriologische Technik eingeführt worden; wenn man nämlich Blutserum einige Zeit auf etwa 65° erwärmt, so erstarrt es ziemlich durchsichtig; durch Aenderungen der Konzentration und der Schnelligkeit des Erwärmens läßt sich die Art der Gerinnung etwas beeinflussen.

Wenn die Koagulation in salzfreier Lösung oder bei saurer Reaktion ausgeführt wird, so koaguliert jeder Eiweißkörper bei einer bestimmten Temperatur. Im allgemeinen koagulieren die komplizierten, gewebsbildenden Eiweiße, sowie die differenzierteren Körper, wie Fibrinogen und Myosin, schon bei niedrigerer Temperatur als die einfachen Albumine und Globuline. Indessen kommt auf die Art des Erhitzens so viel an, daß

Digitized by Google

sich die Bestimmung des Koagulationspunktes kaum zur Charakterisierung der Eiweißkörper verwenden läßt. Einige Grade unter der Temperatur, bei der die Koagulation momentan eintritt, wird der Eiweißkörper gefällt, wenn man ihn längere Zeit erwärmt. Weiterhin hat die Anwesenheit von Salzen einen bedeutenden Einfluß, indem sie den Koagulationspunkt um 2 bis 12° erhöhen. Bei Verminderung des Druckes ändert sich die Koagulationstemperatur der Eiweißkörper gar nicht, was das Kochen der Speisen auf hohen Bergen erschwert.

β) Andere Methoden der Denaturierung. Dieselbe Umwandlung des natürlich vorkommenden kolloidalen in den denaturierten Zustand erleiden die Eiweißkörper durch vieles andere. Sie tun es zunächst beim Verweilen im ungelösten Zustande; Globulin, Fibrinogen und Myosin werden dabei so schnell unlöslich, daß es das Arbeiten mit ihnen erschwert; aber auch die dauerhafteren Albuminkristalle werden beim Stehen in einer Ammonsulfatlösung schließlich in denaturierte Pseudomorphosen verwandelt. In ganz trokkenem Zustande sind sie haltbarer. Reine Eiweißkristalle vertragen ein kurzes Erhitzen auf 150° oder eine 5 stündige Erhitzung auf 120°. Casein ist empfindlicher. Bei längerem Erhitzen in ungelöstem Zustande nimmt die Verdaulichkeit durch Pepsin und Trypsin ab.

Weiterhin erfolgt die Denaturierung durch alle Fällungsmittel mit Ausnahme des Aussalzens. Doch erfolgt die Denaturierung meist nicht sofort; in salzfreier Lösung fällt der Alkohol die Eiweißkörper nur schwer, und sie bleiben zunächst noch löslich, bei Zusatz einer Spur von Salz aber erfolgt eine reichliche Fällung, und die kolloiden Eiweiße werden bald denaturiert. Nicht anders als Alkohol verhält sich Aceton, indem die Eiweißkörper zunächst löslich gefällt und erst sekundär denaturiert werden, und auch die Fällungen durch Phosphorwolframsäure und durch Schwermetallsalze sind anfangs reversibel, später nicht mehr. Im Laufe der Reindarstellung, besonders wenn dabei häufige Fällungen mit Alkohol und Aether benutzt werden, können Eiweißkörper wie Zein und Casein nicht nur ihre Löslichkeit, sondern auch ihre Verdaulichkeit ganz einbüßen.

Wie die gelösten Eiweiße verhalten sich auch die festen, das Fibrin und die gewebsbildenden; auch sie werden durch Erhitzen, Alkohol, Metallsalze, Formaldehyd usw. koaguliert und denaturiert. Auf dieser Koagulation beruht die Härtung und Fixierung von Organen und Präparaten. Die dazu verwendeten Verbindungen, Alkohol, Sublimat, Formaldehyd, Salpetersäure usw., sind alle Eiweißfäller.

Mit der Denaturierung gehen den Eiweißkörpern die Differenzen in der Löslichkeit verloren; alle denaturierten Eiweißkörper verhalten sich darin gleich, daß sie in Alkalien und Säuren löslich, in Wasser und Salzen unlöslich sind. Auch ist ihnen allen gemeinsam, daß die Acidalbumine und Alkalialbuminate in verdünntem Alkohol sehr viel löslicher sind als die nativen Eiweißkörper. Dagegen bleiben Zusammensetzung, chemische Natur, Reaktionen, Salzbildung usw. natürlich erhalten. Für die mikroskopische Färbung, die ja ganz überwiegend an koaguliertem Eiweiß vorgenommen wird, ist es von entscheidender Wichtigkeit, daß die verschiedene Löslichkeit und Hydrolysierbarkeit der Salze der Eiweißkörper mit Farbstoffen bei den denaturierten Eiweißkörpern ebensogut wie bei den nativen zu beobachten ist. Ob im einzelnen hierbei Unterschiede existieren, ist freilich nicht untersucht.

Ein besonders sorgfältig untersuchtes denaturiertes Eiweiß ist das „aschefreie Eiweiß“, das man erhält, indem man Eiereiweiß mit Kupfersalzen fällt, das Kupferalbuminat in Alkali löst, durch genaues Neutralisieren fällt und dies mehrmals wiederholt.

Im Gegensatz zu den natürlichen Eiweißen werden die Halogeneiweiße, das Oxyprotein, die Methyleneiweiße und die Verbindungen der Eiweißkörper mit Silber und mit Osmiumsäure (vgl. Abschnitt 10) durch Erhitzen nicht koaguliert. Man muß wohl annehmen, daß es sich bei ihnen überhaupt um Verbindungen von denaturiertem Eiweiß handelt. Bemerkenswert ist, daß sie alle die Schwefelbleireaktion nicht oder schlecht geben sollen.

γ) Die Spaltung des Eiweiß durch Säuren und Alkalien. Nahe verwandt mit den Erscheinungen der Koagulation ist die Spaltung des Eiweiß durch Alkalien und Säuren, da es hierbei zunächst auch in Alkalialbuminat oder Acidalbumin umgewandelt wird. Freilich bleibt der Prozeß hierbei nicht stehen, sondern es treten früher oder später neben dem Acidalbumin oder Alkalialbuminat Albumosen und Peptone auf. Ja bei Einwirkung auch nur einigermaßen stärkerer Säuren oder Alkalien beginnt der Prozeß der Abspaltung anscheinend gleichzeitig mit dem der Umwandlung, und es tritt die Erscheinung ein, die in den Abschnitten 3 und 10 geschildert ist, daß ein Teil des Eiweiß weiterverwandelt wird, während ein widerstandsfähiger Rest zurückbleibt. Das Acidalbumin des ganzen Eiweiß und das nur der Antigruppe angehörende Acidalbumin haben äußerlich, nach Löslichkeit und Fällbarkeit, die gleichen Eigenschaften, so daß äußerlich

Digitized by Google

die Spaltung des Eiweiß sich nicht von der bloßen Denaturierung unterscheidet.

In ihrer Empfindlichkeit gegen Alkali- und Säurewirkung zeigen die einzelnen Eiweißkörper Differenzen. Das Myosin wird außerordentlich leicht in Acidalbumin übergeführt, durch einen Tropfen $^1/_{10}$ n-Salzsäure in wenigen Minuten, so daß die Koagulation des Myosins auf Schwierigkeiten stößt. Für dies sehr leicht entstehende Acidalbumin des Muskeleiweiß wurde speziell der Name Syntonin eingeführt; er wird indessen auch für alle Acidalbumine ohne Unterschied angewendet. Das Eieralbumin wird bei Zimmertemperatur durch $^1/_8$ n-HCl in 1 Stunde umgewandelt, das Serumalbumin gar durch $^1/_4$ n-HCl erst in vielen Stunden. Pepsin (s. Abschnitt 5) beschleunigt die Säurewirkung sehr.

Viel empfindlicher als gegen Säuren ist das native Eiweiß gegen Alkalien, die Alkalialbuminatbildung erfolgt im allgemeinen schneller, bei niederer Temperatur und geringerer Konzentration. So genügt bei Zimmertemperatur eine $^1/_{20}$ n-Natronlauge, um in $2\frac{1}{2}$ Stunden Serumalbumin zum großen Teil in Alkalialbuminat überzuführen; auch kommt es schon hierbei zur Ammoniakentwickelung. Eine $\frac{1}{2}$ n-Natronlauge aber zersetzt das Serumalbumin in weitem Maße, eine $^1/_{16}$n-Kalilauge zerstört Eiereiweiß zum großen Teil. Mucin verliert durch Alkali sehr leicht seine charakteristischen physikalischen Eigenschaften, Casein spaltet Phosphorsäure ab.

Abweichend von der bisher besprochenen Bildung von Acidalbumin und Alkalialbuminat, die sich äußerlich bei Salzmangel gar nicht, bei Salzgegenwart durch eine Fällung zu erkennen gibt, gestaltet sich die Erscheinung, wenn man konzentriertere Säuren und Laugen und konzentrierte Eiweißlösungen anwendet. Dann verwandelt sich die Flüssigkeit in eine mehr oder minder steife Gallerte, die alle Uebergänge zwischen heller, glasartiger Durchsichtigkeit und dicker, weißer Opaleszenz zeigen kann. Diese Gallerte empfing zuerst die Namen Acidalbumin und Alkalialbuminat. Mit dem Viskosimeter ist eine anfängliche Zunahme der inneren Reibung bei der Einwirkung von starken Säuren und Alkalien auf Eiweiß beobachtet.

Ueber Labgerinnung und Blutgerinnung siehe unten Casein und Fibrinogen, über Totenstarre Myosin.

12. Spezieller Teil. Im Abschnitt 4 ist schon darauf hingewiesen worden, daß die Eiweißkörper sich durch ihre Zusammensetzung aus qualitativ und quantitativ verschiedenen Aminosäuren unterscheiden. Selbstverständlich wäre es das Richtigste, diese Verschiedenheit der Bausteine zur Grundlage der Einteilung zu machen. Gewisse Gruppen, wie die Protamine und Histone werden auf diese Weise scharf umgrenzt, die große Masse der natürlich vorkommenden Eiweiße würden in eine, nicht weiter auflösbare Gruppe vereinigt werden müssen. Um auch diese mitzuumfassen, muß man daher die alte, auf Löslichkeit und Vorkommen gestützte Einteilung teilweise beibehalten, und es ist dies auch insofern gerechtfertigt, als sich immer mehr herausstellt, daß zwischen der Zusammensetzung eines Eiweiß aus Aminosäuren und seiner Löslichkeit und seinen sonstigen Eigenschaften ein Zusammenhang besteht, daß die alten Gruppen also natürliche sind.

Danach bilden den Mittelpunkt des Systems die in der Natur vorkommenden einfachen Eiweißkörper. Ihnen gegenüber stehen einmal die noch eiweißartigen Körper, die durch Umwandlung oder Spaltung aus ihnen hervorgehen, die Acidalbumine und Alkalialbuminate, die Albumosen, Peptone und Peptide, die Halogeneiweiße usw. Die dritte Gruppe sind die Proteide oder zusammengesetzten Eiweiße, die aus einer Verbindung eines Eiweißkörpers mit einem anderen Körper, einer „prostetischen Gruppe" bestehen, und die nach dieser prosthetischen Gruppe eingeteilt werden. Die alte Einteilung der nativen Eiweißkörper in die wasserlöslichen Albumine und die in Wasser unlöslichen, in Säuren, Alkalien und Salzen löslichen Globuline hat sich bewährt. Die Albumine sind zwar sehr verschieden zusammengesetzt, aber sie ähneln sich in ihrem Verhalten, besonders ihrer Kristallisierbarkeit, auch zeigen sie und die Globuline unter sich sehr übereinstimmende Aussalzungsgrenzen, sowie auch einige Uebereinstimmung in der Anordnung der Aminosäuren. Die weiteren Gruppen der alkohollöslichen Pflanzeneiweiße, der Histone und Protamine sind natürlich.

Eine weitere Gruppe von einfachen Eiweißkörpern sind die „Albuminoide", die im festen Aggregatzustande die tierischen Gerüstsubstanzen bilden; der Name umfaßt also keine chemische, sondern eine anatomische Einheit. Doch bedingt die gemeinsame Funktion auch eine Gemeinsamkeit mancher Eigenschaften. Das Schema der Eiweißeinteilung würde also lauten:

A. Einfache Eiweißkörper.

I. Albumine. Serumalbumin, Eieralbumin, Milchalbumin.

II. Globuline. Serumglobulin, Fibrinogen und Fibrin. Milchglobulin, Eierglobulin, Percaglobulin, Kristallin, Pankreasglo-

Digitized by Google

bulin, Harnglobuline, Organglobuline, Myosin, Pflanzenglobuline.

III. Alkohollösliche Pflanzeneiweiße. Gliadin, Hordein, Zein.

IV. Histone.

V. Protamine.

VI. Gerüsteiweiße (früher Albuminoide).

1. Kollagen.
2. Keratin, Koilin.
3. Elastin.
4. Fibroin und Seidenleim.
5. Spongin, Gorgonin usw.
6. Conchiolin.
7. Amyloid.
8. Ichthylepidin.
9. Andere Gerüsteiweiße (Albumoide).

B. Umwandlungsprodukte.

1. Acidalbumin und Alkalialbuminat.
2. Albumosen, Peptone, Peptide.
3. Halogeneiweiße, Oxyprotsulfonsäure usw.

C. Proteide oder zusammengesetzte Eiweiße.

1. Phosphoproteide.
2. Nucleoproteide.
3. Hämoglobin und Verwandte.
4. Glykoproteide. Mucine, Mucoide, Helicoproteid.

A. Die einfachen Eiweißkörper.

Die zunächst zu besprechende Gruppe der einfachen, koagulierbaren, nativen, genuinen oder echten Eiweiße, der Albumine und Globuline kann als Typus der Klasse angesehen werden. An ihnen haftete im ursprünglichen Sinne allein der Name Eiweiß, und alle älteren Schilderungen, zumal über das physikalische Verhalten der Eiweißkörper, beziehen sich auf die Albumine und Globuline.

I. Die Albumine.

Die Albumine sind koagulierbare neutrale Eiweißkörper, die in salzfreiem Wasser löslich sind. Ebenso sind sie in verdünnten Salzlösungen, Säuren und Alkalien löslich. Ihre reinen Lösungen sind genau neutral. Im allgemeinen sind sie schwerer fällbar als die Globuline und viele Proteide, was zu ihrer Reindarstellung häufig Verwendung gefunden hat. So werden sie durch Berührung mit Tierkohle oder Ton, im Unterschiede etwa vom Casein, nicht unlöslich, können daher durch Tonplatten filtriert werden, ohne auszufallen. Durch NaCl und $MgSO_4$ werden sie bei neutraler Reaktion nicht ausgesalzen.

Für Ammonsulfat liegen ihre Fällungsgrenzen nach Hofmeister zwischen 6,4 und 9, also sehr hoch; sie werden demnach durch Halbsättigung ihrer Lösungen nicht ausgesalzen, wohl das bequemste Mittel, um sie von den Globulinen zu trennen, mit denen sie stets zusammen vorkommen.

Die Albumine sind kristallinisch bekannt. In ihrer Zusammensetzung haben sie nur gemeinsam, daß sie kein Glykokoll enthalten.

Serumalbumin. Es bildet einen wechselnden Anteil der Eiweißkörper des Blutserums der Wirbeltiere, kommt ebenso in der Lymphe vor und findet sich daher in allen nicht gründlich von Blut und Lymphe befreiten Organen. Bei Nierenentzündungen geht es in den Harn über, ebenso in pathologische Transsudate. Die Kristallisation gelang zuerst aus Pferdeblut und geschieht am bequemsten durch Ammonsulfat und Schwefelsäure. Auch aus Kaninchenblut ist es kristallinisch gewonnen, bei anderen Tieren nur amorph. Analyse siehe Abschnitt 11, Spaltungsprodukte Abschnitt 4. Sehr hoch ist der Gehalt aus Leucin, ferner der an Cystin und daher an Schwefel. Die Koagulationstemperatur ist um 67°.

Sehr bemerkenswert ist das Verhalten des nativen Serumalbumins gegen Trypsin. Das Serumalbumin wird nämlich von dem Trypsin kaum gespalten, geht aber mit dem Trypsin wie andere Eiweißkörper eine Verbindung ein, und entzieht dadurch anderen, leichter spaltbaren Eiweißkörpern das Trypsin, wirkt also „antitryptisch". Denaturierung vernichtet diese Eigenschaft. Auch gegen Säuren ist Serumalbumin sehr resistent, Alkohol und Aether denaturieren nur langsam.

Eieralbumin. Das Eieralbumin bildet den Hauptbestandteil der konzentrierten Eiweißlösung, die als Eiereiweiß, Eierweiß, Hühnereiweiß oder Eierklar bezeichnet wird und das Weiße der Hühnereier bildet. Sie enthält außer dem Eieralbumin noch ein Globulin und ein Mucoid, von denen das letztere erst relativ spät von dem Eieralbumin getrennt wurde. Alle älteren und viele neueren Untersuchungen beziehen sich daher nicht auf das reine Eieralbumin, sondern auf sein Gemenge mit dem einen oder anderen dieser Eiweißkörper.

Das Eieralbumin enthält neben den Aminosäuren Glucosamin, ist also kein einfaches Eiweiß, sondern ein Glycoproteid, und wird nur der Tradition folgend zu dieser Stelle zugeführt. Ueber das Glucosamin siehe bei den Glycoproteiden. Daß man das Eieralbumin für einen einfachen Eiweißkörper hielt, und die Zuckerabspaltung aus ihm

Digitized by Google

infolgedessen verallgemeinerte, hat viel Verwirrung hervorgerufen.

Das Eieralbumin aus frischen Hühnereiern kristallisiert gut aus saurer Ammonsulfatlösung; auch aus anderen Vogeleiern (Krähen, Tauben) wurden Kristalle erhalten. Ueber das Eiweiß der Nesthocker siehe Abschnitt 11.

Das Eieralbumin enthält infolge des Glucosamingehalts nur 15% N, und relativ viel Sauerstoff. Der S-Gehalt ist niedrig und neben dem Cystin scheint noch ein anderer S-haltiger Körper vorzukommen. Die Aminosäuren zeigen nichts Charakteristisches. Trotz seiner Kristallisierbarkeit ist das Eieralbumin nur schwer von anderen Kolloiden des Eiereiweißes zu trennen. Gegen Trypsin verhält es sich ähnlich wie Serumalbumin, ist aber nicht ganz so schwer verdaulich.

Milchalbumin. Es ist ein konstanter Bestandteil aller Milcharten, aber neben dem Casein meist nur in geringer Menge vorhanden. Analysen, Spaltungsprodukte und physikalische Konstanten gestatten kein Urteil über etwaige Beziehungen zum Serumalbumin.

Andere Albumine sind nicht bekannt, die aus Organen gewonnenen entstammen Resten von Blut und Lymphe.

Auch Infusorien und Muscheln enthalten kein Albumin. Es ist zwar in der Literatur öfters von „Albuminen" des Eigelbs, von Organen, Bakterien und Pflanzen die Rede, doch ist damit in der Regel nur ein koagulierbares Eiweiß gemeint, kein Albumin in dem hier behandelten Sinne. Ueber die Albumine, die in kleiner Menge in Pflanzensamen gefunden werden, siehe bei den Pflanzenglobulinen.

II. Die Globuline.

Die Globuline sind einfache, koagulierbare Eiweißkörper, die im Gegensatz zu den Albuminen in reinem Wasser und in verdünnten Säuren unlöslich, in verdünnten Alkalien, in Neutralsalzlösungen und stärkeren Säuren dagegen löslich sind. Sie werden daher aus ihren salzhaltigen Lösungen durch Verdünnen mit Wasser, vollständiger noch durch Fortdialysieren der Salze, ganz oder teilweise gefällt, sind aber dann in Salzlösungen wieder löslich. Ebenso werden sie durch Ansäuern ihrer Lösungen, auch schon durch anhaltendes Durchleiten von Kohlensäure, gefällt und sind dann in neutralen Lösungen ebenfalls wieder löslich. Indessen werden sie nach dem Fällen mit Säure oder durch Dialyse sehr bald, viel rascher als die Albumine, unlöslich, d. h. denaturiert und sind nur frisch gefällt wieder vollständig aufzulösen.

Ihre Fällbarkeit durch Säuren und Löslichkeit in Alkalien beruht darauf, daß sie selbst Säuren sind, die auf Lackmus sauer reagieren und Kohlensäure austreiben. Infolgedessen sind sie früher mit den Alkalialbuminaten zusammengeworfen worden.

Schwerer zu erklären ist ihre Löslichkeit in Neutralsalzlösungen; in Abschnitt 9 ist ausgeführt, daß es sich bei den Verbindungen der Eiweißkörper mit Neutralsalzen entweder um „molekulare Verbindungen", um Doppelsalze handelt, oder daß die Eiweißkörper als amphotere Elektrolyte mit beiden Ionen des Salzes Salze bilden. Sicher ist, daß es bei der Löslichkeit des Globulins in Salzen nicht nur auf die absolute Menge des Salzes ankommt, sondern auch auf die Konzentration (Ausfällen durch Verdünnen) und daß alle Salze gleich wirksam sind, die nicht Eiweiß fällen oder aussalzen. Nichtelektrolyte können in keiner Konzentration Globuline in Lösung halten.

Die Globuline werden durch Magnesiumsulfat, teilweise auch durch Chlornatrium, bei vollständiger Sättigung der Lösung ausgesalzen; bei neutralem Ammonsulfat liegen die Grenzen für Serumglobulin bei 2,9 und 4,6, für die anderen Globuline ganz ähnlich: jedenfalls werden sie alle durch Halbsättigung ihrer Lösungen mit Ammonsulfat vollständig gefällt und stehen so in der Mitte zwischen den schwerer aussalzbaren Albuminen und dem Fibrinogen, Casein usw., die noch leichter ausgesalzen werden.

Die Darstellung der Globuline erfolgt sodaß man die globulinhaltige Flüssigkeit, z. B. das Serum, nach Hammarsten mit neutralem Magnesiumsulfat sättigt, oder bequemer mit dem gleichen Volumen kaltgesättigter neutraler Ammonsulfatlösung versetzt. Der Niederschlag wird in Wasser gelöst — falls die anhaftenden Salze nicht genügen sollten, unter Zusatz von etwas Chlornatrium — dann entweder sehr stark mit destilliertem Wasser verdünnt oder besser die Salze durch Dialyse entfernt, und endlich das Globulin durch sehr verdünnte Essigsäure vorsichtig gefällt. Die Ausbeute ist aber bei der Fällung durch Dialyse und Ansäuern schlecht, und falls es nicht auf Salzfreiheit ankommt, ist es zweckmäßiger, das Globulin nur durch wiederholtes Aussalzen darzustellen. — Der Nachweis der Globuline beruht darauf, daß sie phosphorfreie, koagulierbare Eiweiße sind, die durch Verdünnen und Ansäuern gefällt werden, sowie auf ihrem Verhalten zu Salzen. In ihrer Löslichkeit ähneln sie den Phosphorproteiden, und da die Globuline sehr leicht Lecithin und Phosphate aus Flüssigkeiten und Geweben festhalten, so sind sie sehr oft mit Phosphoproteiden verwechselt worden.

Diese Schilderung bezieht sich zunächst

Digitized by Google

nur auf die tierischen Globuline, die pflanzlichen weichen in verschiedenen Punkten etwas ab, und gemeinsam ist ihnen allen nur, daß sie in Wasser unlöslich, in Salzlösungen löslich sind.

Bei dem Arbeiten mit Globulin müssen alle Manipulationen sehr rasch vorgenommen werden, da das nicht gelöste Globulin schnell unlöslich wird.

In der Natur sind die Globuline teils, wie im Blutserum, in Kochsalz gelöst, auch wohl in Phosphaten oder anderen Salzen, teils bilden sie Salze mit Alkalien. Sie sind die verbreitetsten Eiweiße. Im Blutplasma gehören zu ihnen Serumglobulin und Fibrinogen, ferner enthält das Protoplasma Globuline, von denen das Myosin der Muskeln ein gut charakterisierter Körper ist. Endlich gehört die große Mehrzahl der Pflanzeneiweiße zu den Globulinen.

Serumglobulin. Es bildet einen Teil der Eiweißkörper des Blutserums; die relative Menge von Albumin und Globulin schwankt. Ferner geht das Globulin neben Albumin bei Nierenkrankheiten in den Harn, in Transsudate, ins Fruchtwasser und in die Lymphe über. Auch die Cerebrospinalflüssigkeit enthält nebeneinander Albumin und Globulin. Das Harneiweiß scheint überwiegend Globulin zu sein. Bedeutende Mengen von Globulin (und Albumin) sind in entzündlichen Exsudaten der Bauchhöhle oder Brusthöhle vorhanden. Das Serumalbumin ist nicht in Kristallen bekannt. Die Analysen zeigen keine Besonderheit, ebensowenig die Spaltungsprodukte. Zwischen den Serumglobulinen verschiedener Tiere haben sich bisher keine Unterschiede ergeben. Der Glykokollgehalt ist relativ hoch, und in Beziehung dazu steht die Schwerspaltbarkeit durch Fermente, die im Unterschiede zum Albumin auch dem denaturierten Eiweiß zukommt. Der Schwefel ist nur als Cystin vorhanden und wenig reichlich. Die Koagulationstemperatur ist 75° und schwankt kaum.

Viel diskutiert ist die Frage nach der Einheitlichkeit der Serumglobulins. Durch Verdünnen einer Lösung mit Wasser, durch die Dialyse, durch Ansäuern wird das Serumglobulin unvollständig gefällt; doch ist sowohl der gefällte wie der nicht gefällte Teil dann wieder teilweise fällbar und es liegt bisher auch sonst kein sicherer Grund vor, eine Vielheit anzunehmen.

Fibrinogen und Fibrin. Das Fibrinogen ist im Blutplasma aller Wirbeltiere enthalten; es wird, sobald das Blut die Ader verläßt, unter pathologischen Verhältnissen schon im Gefäßsystem, durch das Fibrinferment in Fibrin verwandelt und bedingt dadurch die Gerinnung des Blutes. Das Plasma enthält 0,3 bis 0,5% Fibrinogen. Ueber Fibrinferment und Blutgerinnung vgl. den Artikel „Blut“ S. 66.

Die Aussalzungsgrenzen für Ammonsulfat liegen bei 1,7 bis 1,9 und 2,5 bis 2,8, je nach der Konzentration. Magnesiumsulfat und Natriumchlorid salzen bereits vor der vollen Sättigung aus, die ältesten Reindarstellungen beruhen auf der Fällung mit dem gleichen Volumen einer gesättigten Kochsalzlösung, die ein sehr reines Präparat, wenn auch in schlechter Ausbeute, liefert. Zur Darstellung eignet sich am meisten Pferdeblut; doch kann auch anderes Blut, das durch Zusatz von 1 Prom. Natriumoxalat oder durch Fluornatrium ungerinnbar gemacht ist, verwendet werden. Die Koagulationstemperatur ist 56°. Analysen und Spaltungsprodukte ergeben nichts Besonderes.

Das ausgefällte Fibrinogen ist ein zäher, sehr elastischer, zusammenklebender Körper von der Konsistenz der bei der Blutgerinnung gebildeten Gallerte. Es hat die Besonderheit, noch weit rascher als die anderen Globuline unlöslich zu werden, gleichgültig, ob es durch Verdünnen mit Wasser, durch Säure oder durch Aussalzen gefällt ist; am schnellsten geschieht dies, wie übrigens in gewisser Weise bei allen Eiweißen, in Gegenwart von Kalksalzen. Auch in Lösung verändert es sich rasch und verliert bei zu lange fortgesetzter Dialyse, noch ehe es ausfällt, seine charakteristische Gerinnungsfähigkeit.

Durch die Einwirkung des Fibrinferments wird das Fibrinogen zu Fibrin. Es gerinnt und geht in den festen Aggregatzustand über. Dieser geronnene Zustand ist ein Mittelding zwischen dem löslichen Zustande, in dem sich die Eiweißkörper nach dem Ausfällen mit Salzen befinden, und dem koagulierten, in den sie nach der Denaturierung übergehen. Fibrin ist in Wasser und Salzlösungen unlöslich geworden, aber es kann nachträglich noch durch die gewöhnlichen Mittel, Hitze, Alkohol, Formaldehyd, denaturiert und damit fester koaguliert werden.

Worin die Umwandlung des Fibrinogens in Fibrin besteht, ist nicht bekannt. Es bleibt aber dabei, ebenso übrigens auch bei der Koagulation des Fibrinogens durch Erwärmen auf 56° und bei der Fällung durch Essigsäure, stets ein Eiweißkörper in Lösung, das sogenannte Fibringlobulin. Nur 77 bis 80% des Fibrinogens fallen aus, so daß es sich bei der Gerinnung wahrscheinlich um eine hydrolytische Spaltung des Fibrinogens durch das proteolytische Ferment der Blutplättchen handelt. Doch werden auch noch andere Auffassungen vertreten.

Das Fibrin, der bekannte Faserstoff des Blutes, ist ein zäher, derb elastischer, gallertartiger Körper. Er ist äußerst voluminös, da er trotz seiner geringen Menge die ganze

Digitized by Google

Blutmasse oder eine dünne Fibrinogenlösung zum Erstarren bringt. Mit der Zeit zieht sich das Fibringerinnsel indessen zusammen, hält die Formelemente des Blutes zwar fest, läßt das Serum aber zum großen Teil austreten. Schlägt man eine Fibrinogenlösung, Plasma oder Blut während der Gerinnung mit einem Glasstabe, so erstarrt die Lösung nicht, sondern das Fibrin scheidet sich als eine glasige, elastische Masse um den Glasstab aus.

Fibrin schlägt Fermente und andere chemische Körper leicht auf sich nieder. Der gewöhnliche Blutfaserstoff enthält immer Zellreste, Hämoglobin und vor allem Globulin. Bei Behandlung mit Salzsäure quillt das Fibrin zu einer glasigdurchsichtigen Masse, die viel Salzsäure gebunden enthält. Zusatz von Neutralsalzen läßt dies Säurefibrin schrumpfen. Nur in dem gequollenen Zustande ist Fibrin durch Pepsin-Salzsäure verdaulich, wird dann aber außerordentlich leicht gelöst; ebenso ist es durch Trypsin sehr leicht verdaulich.

Eier- und Milchglobulin. Sie haben die Eigenschaften des Serumglobulins; die Spaltungsprodukte sind nicht untersucht. Beide kommen in sehr geringer Menge neben dem Albumin vor. Auch in Fischeiern sind Globuline gefunden. In nicht ganz reifen Ovarien vom Barsch (Perca fluviatilis) findet sich in der Zwischenflüssigkeit in reichlicher Menge ein eigentümliches Globulin, das vor der Eiablage verschwindet. Dies Percaglobulin hat zwei ungewöhnliche Eigenschaften: es hat einen stark adstringierenden, an manche Metalle erinnernden Geschmack, der bei der Denaturierung verloren geht, und es gibt mit Glycogen, Stärkekleister, Pflanzenschleim und vor allem mit Ovomucoid eine Fällung.

Harneiweiß von Bence-Jones. Von Patienten mit einer multiplen Sarcomatose des Knochenmarks wird vorübergehend oder während der ganzen Dauer der Krankheit ein Eiweißkörper im Harn ausgeschieden, den man anfangs für eine Albumose hielt, und der sich durch sein Verhalten beim Erhitzen vor allen anderen Eiweißen auszeichnet. Er koaguliert bei 50 bis 58°, löst sich aber bei höherer Temperatur wieder auf, wenn reichlichere Mengen von Ammoniaksalzen oder Harnstoff vorhanden sind. Auch die Salpetersäure- und die Alkoholfällung lösen sich bei Gegenwart von Chlorammonium wieder auf; beim Abkühlen kehrt die Fällung wieder. Da der Harn nun stets Harnstoff und Chlorammonium enthält, ist dies im Harn und meist auch bei dem isolierten Körper der Fall. Der wirklich gereinigte Körper koaguliert vollständig, durch Alkohol und andere Fällungsmittel wird er denaturiert und durch stärkere Säure- oder Alkaliwirkung in Acidalbumin oder Alkalialbuminat umgewandelt. Auch liefert er bei der Pepsinverdauung Albumosen und Peptone, muß also ein genuines Eiweiß sein. Die Grenzen für Ammonsulfat sind 4 und 6, sie schwanken je nach der Reinheit etwas. Aus saurer Ammonsulfatlösung kristallisiert der Körper.

Wegen seiner leichten Erkennbarkeit ist das Bence-Jonessche Eiweiß benutzt worden, um einen gezeichneten Eiweißkörper durch den Organismus zu verfolgen.

Die Spaltungsprodukte sind die gewöhnlichen.

Myosin. Die quergestreiften Muskeln bestehen aus den Sarcolemmschläuchen, die mit einer eiweißreichen Flüssigkeit, dem Sarcoplasma, gefüllt sind. Nach dem Tode oder nach einer längeren Unterbrechung der Zirkulation gerinnt diese Flüssigkeit, der Muskel wird totenstarr, nach einer längeren oder kürzeren Zeit löst sich die Starre, der Muskel wird passiv beweglich, ja er kann eine gewisse Erregbarkeit wieder gewinnen. Kühne fand nun, daß in dem Sarcoplasma und in dem aus gefrorenen und kalt zerkleinerten Froschmuskeln erhaltenen Muskelplasma ein eigenartiges Eiweiß gelöst ist, das Myosin, das spontan gerinnt, d. h. in eine fibrinähnliche Modifikation übergeht; auf dieser Gerinnung des Myosins beruht die Totenstarre. In der Chemie der Muskeleiweiße bestehen noch eine Menge ungeklärter Punkte; denn nach dem Tode tritt in den Muskeln saure Reaktion auf, die auf der Bildung von Milchsäure beruht. Milchsäure entsteht nicht, solange der Muskel mit Sauerstoff versorgt ist; wenn die Sauerstoffversorgung aber aufhört, so werden durch ein Ferment oder durch die Tätigkeit des absterbenden Protoplasmas bedeutende Mengen von Milchsäure gebildet. Wenn man also nicht den Muskel unter ständiger Sauerstoffzufuhr extrahiert — und das ist bisher nicht geschehen —, so muß sich im Laufe des Arbeitens mit dem Muskel, des Extrahierens des Eiweiß aus dem Muskel, fortwährend die Reaktion der Eiweißlösung ändern, und bei dem großen Einfluß der Reaktion auf die Löslichkeit der Globuline muß sich damit auch die Löslichkeit des Muskeleiweißes fortdauernd ändern.

Kühne nahm nur einen spezifischen Muskeleiweißkörper an, das Myosin, das bei 47° koaguliert. In Lösung oder schon in dem Muskel „gerinnt" es, d. h. es fällt aus, ist aber dann in Salzlösungen wieder löslich; dies wieder gelöste Myosin hat einen Koagulationspunkt von 56°. Extrahiert man einen Muskel während der schon beginnenden Gerinnung mit Salzlösungen, so findet man nebeneinander einen Eiweißkörper, der bei 56° ausfällt, das umgewandelte, und einen,

Digitized by Google

der schon bei 47° gefällt wird, das noch nicht umgewandelte Moysin. Die späteren Untersucher, besonders v. Fürth, nehmen dagegen an, daß im Muskel nebeneinander 2 Eiweißkörper existierten, Myosin und Myogen, beide Globuline, aber von verschiedener Löslichkeit und mit verschiedenen Aussalzungsgrenzen. Für die Gerinnung des Myosins, die zur Totenstarre führt, ist die einfachste Erklärung, daß die im absterbenden Muskel sich bildende Milchsäure das Myosin fällt, und so den Inhalt der Muskelschläuche, der eine konzentrierte Eiweißlösung ist, erstarren macht. Bei der nachträglichen Lösung der Totenstarre ziehen sich vielleicht einfach die Gerinnsel in den Sarcolemmschläuchen wie der Blutkuchen zusammen und pressen die vorher in ihnen enthaltene Flüssigkeit aus. Vielleicht spielen Quellungserscheinungen, die bei dem Myosin und dem Muskel sehr entwickelt sind, eine Rolle. Auf die Gerinnung des ganzen Muskels, ihre Beeinflussung durch die Temperatur und durch Reagenzien kann hier nicht eingegangen werden.

Aus den Säugetiermuskeln läßt sich das Myosin am besten mit einer 10 prozentigen Chlorammoniumlösung in Lösung bringen, weniger gut mit anderen Neutralsalzen. Beim Kaninchen gehen 78 bis 88% des Gesamteiweißes des Muskels in Lösung, bei Vögeln schwanken die Zahlen etwas mehr. Der Rest ist Stromaeiweiß, Kollagen usw. Aus der Salzlösung läßt sich das Myosin durch Verdünnen, besser durch Dialyse und Kohlensäure fällen. Das Myosin quillt durch Säuren eigentümlich glasig und schleimig, in ähnlicher Weise wie Fibrin, und diese Quellungsfähigkeit des Myosins und damit des Muskels spielt bei der Fixierung des Wassers in den Körpermuskeln, dessen Menge im Leben stark wechselt, wahrscheinlich eine höchst wichtige Rolle. Salze beeinflussen den Quellungsvorgang. Durch etwas stärkere Säuren wird Myosin sehr leicht denaturiert. Das Acidalbumin des Myosins, das eine schleimige Lösung bildet, und das sich durch Säuren aus todesstarren Muskeln leicht extrahieren läßt, wird als Syntonin bezeichnet. Durch Pepsin und Trypsin ist Myosin sehr leicht spaltbar. Analysen und Spaltungsprodukte zeigen keine Besonderheiten. Wegen der Bedeutung für die Ernährungsphysiologie hat man häufig nicht das Myosin auf seine Spaltungsprodukte untersucht, sondern das ganze Muskelfleisch.

Lösliche Eiweißkörper kommen in den Muskeln außer Myosin (und Myogen) nicht vor, wohl aber Gerüsteiweiße, vor allem Leim oder dessen Muttersubstanz, das Collagen. Bei der Herstellung des käuflichen Fleischextrakts geht Collagen teilweise in Form von Albumosen in Lösung.

Die glatten Muskeln (des Schafmagens) scheinen ähnliche Eiweißkörper zu enthalten wie die quergestreiften. Im Herzen sind 32 bis 43% des Eiweiß löslich, also Myosin, im Uterus 28 bis 32%; der Rest ist Gerüsteiweiß. Bei einer Reihe von Wirbellosen finden sich Körper, die in ihren Reaktionen dem Myogen ähneln, aber meist einen etwas niedrigeren Koagulationspunkt besitzen. In Fischmuskeln findet sich das „Myoproteid". Spontan gerinnende Körper und Eiweißkörper von der niederen Koagulationstemperatur des Myosins sind auch in Drüsen, Schleimhautextrakten und anderen Organen gefunden worden. Wie weit dabei die postmortale Säuerung der Organe eine Rolle spielt, ist aber nicht bekannt.

Organglobuline. Globuline sind aus vielen Organen gewonnen worden, so aus der Leber, der Niere, den weißen und roten Blutkörperchen, aus dem Knochenmark, dem Pankreas, dem Gehirn usw. Ein Teil mag beigemengtes Serumglobulin sein, zu einem Teile sind saure Proteide mit untersucht worden, aber ein Teil sind sicher Zellglobuline; der Koagulationspunkt ist oft so niedrig wie beim Myosin. Das jodhaltige Thyreoglobulin der Schilddrüse ist in Abschnitt 10 erwähnt, die zwei Globuline der Linse werden als Kristalline bezeichnet. Bei einer Reihe von Organen hat man die Spaltungsprodukte nicht eines einzelnen Eiweißes, sondern des ganzen Organes untersucht.

Pflanzenglobuline. In den meisten Teilen der Pflanzen treten die Eiweißkörper an Masse zurück und sind daher chemisch kaum studiert worden. Um so mehr ist dies der Fall mit den Eiweißkörpern, die als Reservestoffe für den wachsenden Embryo in den Samen der Kulturgewächse enthalten sind. Seit Liebig existiert eine große Reihe von Beschreibungen dieser leicht zugänglichen und praktisch wichtigen Körper. Besonders eingehend wurden sie dann in der 60er und 70er Jahren von Ritthausen untersucht, der auf Grund der Löslichkeitsverhältnisse eine große Zahl von verschiedenen Eiweißkörpern aus den Getreidearten, Hülsenfrüchten, Lupinen usw. darstellte, benannte und analysierte. Da die von ihm angewandten Methoden nicht immer eine Garantie dafür gewähren, daß er wirklich chemische Individuen in Händen gehabt hat, wurden die Ritthausenschen Untersuchungen lange Zeit wenig beachtet, zumal den Tierphysiologen, von denen die physiologische Chemie in der Hauptsache betrieben wurde, die Verhältnisse der Pflanzensamen ferner lagen. In letzter Zeit hat sich das geändert; E. Schulze, Kossel, E. Fischer, und ihre Mitarbeiter haben eine erhebliche Anzahl von Pflanzeneiweißen dargestellt und ihre

Digitized by Google

Spaltungsprodukte untersucht. Die entscheidenden Aufklärungen verdanken wir dem amerikanischen physiologischen Chemiker T. B. Osborne in New Haven, der die Pflanzeneiweiße zu den best gekannten überhaupt gemacht hat.

Alle Eiweißkörper des Samens sind einfache Eiweißkörper. Die Samen enthalten indessen bedeutende Mengen von unorganischen Phosphaten und organischen Phosphatiden, auch Nucleinsäure, die von den Eiweißkörpern oft schwer zu trennen sind, und dadurch erklären sich die älteren Angaben, die phosphorhaltige, dem Casein oder den Vitellinen aus Eiern verwandte, Phytovitelline oder Pflanzencaseine beschrieben haben. Auch sonst wird das Studium dieser Eiweißkörper in bezug auf ihre Löslichkeit erschwert durch den meist erheblichen Gehalt der Samen an Salzen, unorganischen und organischen Säuren und Basen, und die dadurch entstandene saure oder alkalische Reaktion, oder auch den Gehalt der Samen an Tannin, das bei saurer Reaktion Eiweiß fällt. Sehr oft sind Eiweißsalze mit freien Eiweißkörpern verwechselt worden.

Die große Mehrzahl der Pflanzeneiweiße sind Globuline, da sie nicht in Wasser löslich sind, wohl aber in Salzlösungen. Von den tierischen Globulinen unterscheiden sie sich:

1. durch ihr Verhalten gegenüber den aussalzenden Salzen, das bei den einzelnen Individuen sehr verschieden ist.

2. durch ihre schwere Koagulierbarkeit. Durch Kochen ihrer neutralen Lösungen wird auch bei großem Salzgehalt immer nur ein Teil koaguliert, oft nur der kleinste Teil. Nur wenn beträchtliche Mengen von Säure neben den Salzen vorhanden sind, gelingt die Koagulation; durch derartige Säuremengen werden die Globuline aber zum Teil auch schon in der Kälte gefällt, so daß eine Bestimmung des Koagulationspunktes häufig unmöglich oder sehr unsicher ist. In neutraler Lösung gekocht, verliert Edestin z. B. seine Löslichkeit und Kristallisierbarkeit nicht.

3. teilweise durch ihre Löslichkeit in verdünnten Salzlösungen. Während die tierischen Globuline noch in recht verdünnten Salzlösungen gut löslich sind und kaum durch Dialyse und Kohlensäuredurchleitung ganz gefällt werden können, verhält sich zwar ein Teil der Pflanzenglobuline ebenso, ein anderer aber fällt schon aus, wenn der Gehalt an Kochsalz auf 2 bis 3% herabgeht. Manche Globuline sind auch in warmen (50 bis 60°) Kochsalzlösungen löslich, in kälteren nicht. Diese verschiedene Fällbarkeit ist von Osborne zur Trennung der Individuen benutzt worden.

4. teilweise durch ihr Verhalten gegenüber Säuren und Basen, das an dem Edestin aus Hanfsamen sehr genau studiert wurde. Es bildet, wie alle Eiweißkörper, sowohl mit Säuren wie mit Basen Salze, ist aber überwiegend Säure, und es kristallisiert beim Dialysieren als freies Eiweiß, aus Salzlösungen aber als Salz mit der Säure, die gerade in Lösung ist, aus Kochsalzlösung also als salzsaures Edestin, wobei 1 g Eiweiß 0,005 g HCl bindet. Auch mit Basen kristallisiert es, und die Kristalle von Edestin oder den Edestinsalzen lassen sich nicht durch die Kristallform und kaum durch die Analyse unterscheiden; nur ihre Löslichkeit ist verschieden, da die Salze wasserlöslich sind, das freie Edestin nicht.

Die Pflanzenglobuline werden, wie alle Globuline, sehr leicht in neutralen Flüssigkeiten unlöslich, d. h. denaturiert, können dann aber in Alkalien und Säuren noch leicht löslich sein.

Ein guter Teil der Pflanzenglobuline kristallisiert, und da ihre Lösungen erwärmt werden können und warme Lösungen oft mehr Globulin lösen als kalte, lassen sich diese Pflanzenglobuline nicht nur wie die Albumine durch Ammonsulfat ausscheiden, sondern richtig umkristallisieren und bieten somit von allen Eiweißkörpern die größte Gewähr der Reinheit.

Neben den Globulinen kommen in allen oder den meisten Samen Eiweißkörper vor, die in Wasser löslich sind und sich bei der Dialyse von salzhaltigen Extrakten nicht ausscheiden, die auch wie die tierischen Eiweißkörper durch Erhitzen auf eine bestimmte Temperatur koaguliert werden können. Sie müssen daher nach der gewöhnlichen Nomenklatur zu den Albuminen gerechnet werden, unterscheiden sich aber von den tierischen Albuminen dadurch, daß sie durch Chlornatrium und Magnesiumsulfat ausgesalzen werden, ebenso durch Ammonsulfat bei Halbsättigung.

Diese Albumine haben besonderes physiologisches Interesse, weil an ihnen die in den Samen stets vorhandene Diastase haftet, und weil bei den giftigen Ricinussamen das Gift Ricin ebenfalls an ihnen haftet oder mit ihnen identisch ist. Wo sich der Embryo von seinem Ernährungsmaterial trennen ließ, gehörte das Albumin zu der Zusammensetzung des Embryos. — Ferner kommen in den meisten Pflanzensamen Albumosen vor.

In den Getreidearten kommen nun noch andere Eiweißkörper vor, die für diese Körner charakteristisch sind, nämlich 1. alkohollösliche Eiweißkörper, die als besondere Gruppen nach den Globulinen folgen, und 2. eigenartige Eiweißkörper, die nur in Säuren und besonders in Alkalien löslich sind, nicht in Wasser oder Neutralsalzen. Osborne trennt sie als eigene Gruppe unter dem Namen „Glutenine" von den Globulinen ab. Da bisher nur ein einziger Reprä-

Digitized by Google

sentant dieser Gruppe rein isoliert ist, und da die Globuline so sehr leicht in unlösliche Körper übergehen, hat die Aufstellung dieser Sondergruppe Bedenken, und die „Glutenine“ der Getreidearten werden hier als Globuline mit aufgeführt und unten bei den alkohollöslichen Eiweißen mitbehandelt.

a) Die Globuline aus Oelsamen. Edestin, Excelsin, Amandin, Corylin usw. In diesen Samen sind wenig Kohlehydrate enthalten, dagegen große Mengen von Eiweiß und von Fett. Aus dem durch Aetherextraktion vom Oele befreiten Mehle läßt sich das Eiweiß leicht durch Kochsalzlösung extrahieren, und die Verhältnisse liegen hier besonders einfach, weil die Samen hier in ganz überwiegender Menge immer nur ein Globulin enthalten; in einzelnen Samen finden sich kleine Mengen anderer Globuline oder unlösliche Eiweiße, die nicht weiter untersucht sind, nur in den Ricinussamen findet sich daneben ein Albumin, das Ricin.

Ein großer Teil der hierhin gehörigen Globuline ist in kristallinischer Form bekannt, so die der Paranuß, der Kürbissamen, Ricinussamen und Leinsamen. Die beste Ausbeute liefert Hanfsamen.

Die Globuline dieser Gruppe zeichnen sich alle durch einen hohen Stickstoff- und hohen Argininigehalt aus. Ziemlich ein Viertel des Stickstoffs ist Arginin. Daß sie trotzdem keine ausgesprochenen Basen sind, liegt wohl an dem hohen Gehalt an Glutaminsäure, der zwar nicht entfernt so hoch wie bei den Eiweißkörpern der Getreidearten, immerhin aber erheblich höher als bei tierischen Eiweißen ist. Vorhanden sind alle Aminosäuren. Eines der hierher gehörigen Eiweiße, das Edestin, ist in Abschnitt 4 in der Tabelle aufgeführt.

Genauer untersucht ist das Globulin aus Hanfsamen (Edestin, das sehr gut und leicht kristallisiert), Paranuß (Excelsin), Kürbis, Ricinus (daneben ein Albumin), Leinsamen, Baumwolle, Mandel (Amandin), Pflaumen, Pfirsich, Haselnuß (Corylin), Walnuß (Juglansin), Sonnenblume, Kiefer, Kokosnuß. Die Menge des Globulins in dem fettfreien Mehl schwankt zwischen 30 (Haselnuß) und 5% (Ricinus). An den Eiweißen der Nußarten sind in Abschnitt 4 erwähnte Versuche über die Artspezifizität des Eiweiß gemacht worden.

b) Die Globuline der Leguminosensamen. Phaseolin, Legumin, Conglutin, Vignin, Glycinin usw. Die Verhältnisse liegen bei diesen Samen insofern komplizierter, als sie in der Regel zwei Globuline enthalten; das eine, in überwiegender Menge vorkommende (Legumin, Phaseolin) ist in Kochsalzlösungen von mehr als 2% leicht löslich, in verdünnteren aber nicht, und scheidet sich bei der Dialyse daher leicht aus. In bezug auf Koagulierbarkeit gleichen diese Globuline dem Edestin, d. h. sie werden durch Kochen nur bei Säurezusatz gefällt, durch diesen aber auch ohne Kochen. Das zweite Globulin gleicht dagegen den tierischen Globulinen insofern, als es auch in verdünnter Kochsalzlösung von weniger als 2% noch gut lösbar ist und durch Kochen in neutraler Lösung koaguliert werden kann. Manche der Samen enthalten daneben ein Eiweiß, das durch Dialyse nicht oder nur teilweise gefällt wird und gut koaguliert, das also eher zu den Albuminen zu rechnen ist.

Zwei der hierher gehörigen Eiweiße sind in der Tabelle in Abschnitt 4 aufgeführt. Auch hier ist der Gehalt an Glutaminsäure und Arginin relativ hoch. Die Spaltungsprodukte sind alle vorhanden. Der Stickstoffgehalt ist hoch, 17 bis 18%, der S-Gehalt niedrig.

Genauer untersucht sind die Bohne, Phaseolus vulgaris (15% des Samenmehls Phaseolin, etwas Phaselin), die Adzuki-Bohne (Legumelin), die Erbse ($^{3}/_{8}$ Legumin, je $^{1}/_{8}$ Vicilin und das Albumin Legumelin), Linse, Saubohne (wie Erbse), die Wicke (viel Legumin, wenig Legumelin, kein Vicilin), die Sojabohne (Glycinin, ein 2. Globulin, Legumelin), die Cow Pea, Vigna sinensis, (3 Eiweiße, Hauptmasse Vignin) und die Lupinen, von denen die blaue Lupine nur 1 Eiweiß enthält (Conglutin), die gelbe zwei. An der Bohne, Linse, Wicke sind Untersuchungen über Artspezifität gemacht worden.

c) Die Globuline der Getreidearten. Hier muß man den Keim und das Endosperm unterscheiden. Der Keim enthält ein Globulin, ein Albumin, das Osborne Leucosin nennt, und in der Regel auch Albumosen. In dem Endosperm ist die Hauptmenge des Eiweiß enthalten, beim Weizen etwa 90%, in dem Mehle noch mehr, und es enthält immer zwei charakteristische Eiweißkörper in annähernd gleicher Menge, eines, das in verdünntem Alkohol löslich ist, und eines, das in Wasser, Alkohol und Neutralsalzlösungen unlöslich, nur in Säuren und Alkalien löslich ist. Von diesen letzteren, die Osborne als eine besondere Klasse zusammenfaßt, ist es aber bisher nur gelungen, das Glutenin des Weizens rein darzustellen. Die alkohollöslichen Pflanzeneiweiße bilden eine gut abgegrenzte Gruppe, die für sich besprochen wird. Dort soll auch von den Eigenschaften des Klebers die Rede sein. Hier werden demnach nur die Leucosine und Globuline behandelt, die sich in Beziehung auf ihre Löslichkeit und Fällbarkeit wie Legumelin und Legumin der vorigen Gruppe verhalten. Die Leucosine sind bei 50 bis 60° durch Hitze koagulierbar, die Globuline nicht oder nur durch Säure. Beide kommen in den meisten Mehlen und den ganzen Körnern nur in geringer Menge vor, an dem Leucosin haftet die Diastase, und bei der

Digitized by Google

Extraktion bekommt man es zusammen mit der Nucleinsäure. Die Spaltungsprodukte bieten keine Besonderheiten, der N-Gehalt ist 17 bis 18%, der S-Gehalt beim Leucosin über 1%, bei den Globulinen 0,7%.

Im Weizenkorn sind 0,4% Leucosin enthalten, im Mehl 0,6% Globulin, im Keim etwa 10% Albumin.

Im Roggenmehl sind etwa 0,4% Leucosin enthalten, 1,7% Globulin und Albumose.

In der Gerste ist das relative Mengenverhältnis dasselbe wie in Roggen und Weizen. In Gerstenmalz fand sich daneben noch ein edestinartiges Globulin.

Im Mais konnte ein Albumin nicht mit Sicherheit gefunden werden, dagegen mehrere Globuline.

Im Hafer sind nur Spuren von Albumin enthalten, dagegen eine große Quantität von Globulin, das an Menge den alkohollöslichen Eiweißkörper übertrifft. Es kristallisiert.

1 kg Reis enthält 1,4 g Globulin und 0,4 g Leuconin.

III. Die alkohollöslichen Eiweißkörper der Getreidearten.

Gliadin, Hordein, Zein, Avenin, Kleber.

Weizen und Roggen; Gliadin, Glutenin. Das Endosperm des besonders genau untersuchten Weizenkorns enthält neben viel Kohlenhydraten zwei einfache Eiweißkörper, das alkohollösliche Gliadin und das Glutenin, das in Wasser und neutralen Salzlösungen unlöslich ist und sich nur in Säuren und besonders in Alkalien löst. Die beiden Eiweißkörper bilden zusammen das Klebereiweiß oder Gluten, das beim Behandeln des Weizenmehles mit Wasser als eine teigige Masse von eigentümlicher Konsistenz zurückbleibt. Auf den physikalischen Eigenschaften dieses Gemenges beruht die Möglichkeit, Mehl zu Brot zu backen. Beide Eiweiße zusammen wurden früher auch als Pflanzenfibrin bezeichnet, das Glutenin auch als Glutencasein, und sie sind sehr oft untersucht worden. Doch haben auch hier erst Osbornes Untersuchungen wirkliche Klarheit geschaffen. Die absolute Menge des Eiweißes ist in den einzelnen Weizensorten sehr verschieden (um das Zwei- bis Dreifache), immer aber sind Gliadin und Glutenin in etwa gleichen Anteilen vorhanden.

Das Gliadin — und die entsprechenden Eiweiße des Roggens und der Gerste verhalten sich genau so — ist in Salzlösungen unlöslich und wahrscheinlich auch in reinem Wasser, bildet aber schon mit kleinen Mengen von Säure oder Base Salze, die in Wasser löslich sind. Die Salze mit Säuren werden durch Salze, die mit Alkalien durch Carbonate gefällt. In absolutem Alkohol ist es unlöslich, in einem Gemenge von Wasser und Alkohol dagegen leicht löslich, am leichtesten in Alkohol von etwa 70%. Auch andere verdünnte Alkohole lösen. Beim Kochen in alkoholischer Lösung wird Gliadin nicht verändert, beim Kochen einer Aufschwemmung in Wasser oder in sehr verdünntem Alkohol verliert es dagegen seine Löslichkeit. Die Spaltungsprodukte des Gliadins, Hordeins und Zeins sind in der Tabelle in Abschnitt 4 genannt. Das Glutenin zeigt keine besondere Eigentümlichkeit, nur daß der Basengehalt im ganzen niedrig, der an Glutaminsäure und Ammoniak hoch ist; um so mehr das Gliadin, es enthält viel Prolin, mehr als ein Drittel seines Gewichts Glutaminsäure, sehr viel Ammoniak, kein Lysin, wenig Arginin und anscheinend auch kein Glykokoll. Damit erscheint das Gliadin — zusammen mit den ihm nahestehenden Eiweißen der anderen Getreidearten — als eines der bestcharakterisierten Eiweiße überhaupt, und die Bildung einer besonderen Gruppe ist erforderlich. Osborne schlägt für diese Gruppe den Namen „Prolamin" vor, der aber dem „Protamin" zu ähnlich ist.

Die Eiweißkörper des Roggens stimmen mit denen des Weizens ganz nahe überein. Die Reindarstellung des Glutenins stieß bisher wegen der Beimengung eines gummiartigen Kohlenhydrats auf unüberwindliche Schwierigkeiten.

Gerste; Hordein. Ganz ähnlich dem Weizen. Das Glutenin konnte noch nicht isoliert werden, das alkohollösliche Hordein ist eines der vollständigst aufgelösten Eiweiße.

Mais; Zein. Im Mais findet sich das alkohollösliche Eiweiß Zein, das sich durch seine Löslichkeit selbst in starkem Alkohol auszeichnet. In absolutem Alkohol ist es zwar unlöslich, aber in 96 prozentigem Alkohol löst es sich leicht und kann daraus nur durch Aether gefällt werden. Man hat diese Löslichkeit, die es vor allen Eiweißkörpern, Proteiden und Albumosen auszeichnet, benutzt, um den Weg des Zeins durch den Körper zu verfolgen. Außerdem zeichnet sich das Zein dadurch aus, daß es beim Erhitzen mit Wasser leicht ganz unlöslich und dann auch für die Verdauungsfermente schwer angreifbar wird. Auch ohne Erhitzen wird es leicht unlöslich. Es ähnelt in dem hohen Glutaminsäuregehalt den Gliadinen, wenn er auch niedriger ist, auch fehlen ihm wie diesen Lysin und Glykokoll, außerdem aber fehlt ihm das Tryptophan, was ebenfalls zu physiologischen Versuchen benutzt ist. Auffallend hoch ist der Leucingehalt. Das Zein ist nächst den Protaminen am vollständigsten aufgelöst. Das Zein ist im Mais in relativ größerer Menge vorhanden, als das Gliadin

Digitized by Google

im Weizen, Glutenin in geringerer; der Mais liefert daher auch kein Gluten wie Weizen, Roggen und Gerste, und kann nicht zu Brot verbacken werden. Das Glutenin enthält Lysin und Tryptophan, so daß die Eigenart des Zeins bei der Ernährung mit dem ganzen Maiskorn keine Rolle spielt.

Hafer; Avenin. Im Hafer ist ebenfalls ein alkohollösliches Eiweiß vorhanden, das Avenin, das anscheinend viel Schwefel enthält, außerdem ein Globulin, das aus warmer 10prozentiger Kochsalzlösung beim Abkühlen in Kristallen ausfällt. Ein Albumin scheint zu fehlen und auch die Existenz eines Glutenins ist nicht bewiesen; Kleber ist infolgedessen nicht zu erhalten.

Reis; Oryzenin. Im Reis findet sich neben kleinen Mengen Albumin und Globulin als Hauptmasse ein Eiweiß, das sich nur in Alkali löst, das Oryzenin, das also als Glutenin bezeichnet werden muß. Ein alkohollösliches Eiweiß fehlt, und damit die Möglichkeit, aus Reismehl Brot zu backen.

IV. Histone.

Die Histone sind Eiweißkörper, die einen relativ hohen Gehalt an Basen, besonders an Arginin, haben und daher selbst einen überwiegend basischen Charakter annehmen. Sie werden infolgedessen, und das ist ihre auffallendste Eigenschaft, von Alkalien, speziell Ammoniak, gefällt, im Ueberschusse aber — wenigstens die meisten — wieder aufgelöst. In Säuren sind sie sehr leicht löslich; sie verhalten sich also umgekehrt wie die Eiweiße von saurem Charakter, die Globuline und Caseine.

Der N-Gehalt ist hoch (18 bis 2 %), der S-Gehalt niedrig. Unter den Spaltungsprodukten überwiegt das Arginin, auf das etwa $^1/_4$ des N fällt (vgl. Tabelle in Abschnitt 4). Durch Pepsinsalzsäure entsteht das Histopepton (Abschnitt 8).

Die Histone bilden in Verbindung mit Nucleinsäure den Hauptbestandteil der Zellkerne der weißen und kernhaltigen roten Blutkörperchen und der Spermatozoen einiger Fische; auch in anderen zahlreichen Organen, z. B. der Milz ist Histon gefunden.

Nucleohiston aus den Leucocyten der Thymusdrüse. Man extrahiert Thymusdrüsen mit Wasser und fällt aus der Lösung mit Essigsäure ein Nucleoproteid, das Nucleohiston. Wenn man dieses mit Salzsäure von 0,8% behandelt, fällt ein Nuclein aus, und es bleibt Histon in Lösung, das dann mit Ammoniak gefällt wird. Siehe unter Nucleoproteide. Bemerkenswert ist der hohe Gehalt an Tyrosin. Das Thymushiston ist sehr leicht verdaulich und wird sogar von Erepsin angegriffen. Kalbsthymus ist für seine Leichtverdaulichkeit bekannt.

Histon aus den roten Blutkörperchen der Vögel. Die Blutkörperchen der Gans werden wiederholt mittels der Zentrifuge mit Kochsalzlösung gewaschen, und die Zellsubstanz mit Wasser zur Lösung gebracht. Durch abwechselndes Behandeln des kernhaltigen unlöslichen Rückstandes mit Wasser und Kochsalzlösung lassen sich das Hämoglobin und die übrigen Bestandteile des Protoplasmas entfernen, und durch Auskochen mit Alkohol und Aether entfernt man Lecithin und andere Bestandteile der Kernsubstanz. Es bleibt ein Rückstand, der fast nur aus Histon und Nucleinsäure besteht, etwa 42,1% Nucleinsäure und 57,8% Histon enthält. Aus ihm läßt sich mit Salzsäure von 1% der größte Teil des Histons gewinnen.

Histon aus den Spermatozoen von Fischen. Die Spermatozoen mehrerer Fische, des Kabeljaus (Gadus morrhua), der Quappe (Lota vulgaris) und des Dornhais (Centrophorus granulosus), sowie des Seeigels Arbacia pustulosa enthalten in reifem Zustande Histone, ebenfalls an Nucleinsäure gebunden.

In den Hoden des Lachses (Salmo salar) und der Makrele (Scomber scombrus) sind in reifem Zustande Protamine enthalten. Die unreifen Spermatozoen enthalten dagegen Körper, die nach ihren Reaktionen Histone sind. Sie würden also eine Zwischenstufe zwischen den gewöhnlichen Eiweißkörpern und den Protaminen sein, wozu die Histone nach Eigenschaften und Zusammensetzung wohl geeignet sind. Doch ist es nicht ausgeschlossen, daß ein Gemenge von Protamin und Eiweiß vorgelegen hat, das in seinen Reaktionen an die Histone erinnert.

Die Spermatozoen der Säugetiere enthalten nach Miescher und Mathews weder Histon noch Protamin, sondern andere Eiweißkörper.

V. Die Protamine.

Miescher fand 1874 in den reifen Spermatozoen des Lachses eine Base, die er Protamin nannte. Aufgenommen wurden Mieschers Untersuchungen durch Kossel, der die Protamine zu einer der bestgekannten Gruppe der Eiweißkörper gemacht hat. Durch ihn und seine Schüler sind in den Spermatozoen mehrerer Fische Protamine gefunden worden, die untereinander große Aehnlichkeit zeigen, und die Kossel je nach dem Tiere, von dem sie stammen, als Salmin, Sturin, Clupein, Scombrin usw. bezeichnet.

Die Protamine bilden eine gut abgegrenzte Gruppe, die von der Mehrzahl der übrigen Eiweißkörper nicht unerheblich abweicht. Sie sind schwefelfrei und enthalten sehr viel mehr Stickstoff und weniger Kohlen-

Digitized by Google

stoff als die anderen Eiweiße. Die Protamine enthalten nämlich in ganz überwiegendem Maße die basischen Spaltungsprodukte, insbesondere das stickstoffreiche Arginin, das bei den genau untersuchten 58 bis 84% der Spaltungsprodukte ausmacht. Dafür treten die Monoaminosäuren zurück. Glykokoll, Phenylalanin, Asparagin- und Glutaminsäure und Oxypyrrolidincarbonsäure fehlen ganz, ebenso Ammoniak, und die anderen traten immer nur in geringer Menge und vereinzelt auf. Die Bausteine, aus denen sich die Protamine aufbauen, können ebenso zahlreich sein wie die der anderen Eiweiße, aber sie sind weniger verschieden als sonst, die einzelnen wiederholen sich gleichmäßiger. Deshalb gelingt die Auflösung der Protamine in ihre Spaltungsprodukte so sehr viel leichter als bei den anderen Eiweißkörpern, und das ist der Grund, weshalb Kossel sie als einfachste Eiweißkörper bezeichnet (vgl. Abschnitt 4 und 3).

Für das Salmin führen Analyse und Spaltung entweder zu der Zusammensetzung

$C_{81}H_{155}N_{45}O_{18}$ . . . = 10 Mol. Arginin
+ 2 „ Serin
+ 2 „ Prolin
+ 1 „ Valin

oder zu der Zusammensetzung

$C_{98}H_{186}N_{54}O_{21}$ . . . = 12 Mol. Arginin
+ 2 „ Serin
+ 3 „ Prolin
+ 1 „ Valin

Beim Clupein stehen Arginin und Prolin in gleichem Verhältnis zueinander, wie im Salmin, auf 2 Moleküle Valin kommen 1 Molekül Serin und 1 Molekül Alanin.

Beim Scombrin ist die vollständige Aufteilung ebenfalls gelungen; es enthält nur Arginin, Alanin und Prolin, und zwar wie das Salmin in einem Verhältnis, daß 2 Argininmoleküle auf 1 Molekül der beiden anderen Spaltungsprodukte kommen.

Von den Protonen, den Peptonen der Protamine, war schon in Abschnitt 3 und 8 die Rede; sie sind symmetrisch gebaute Diarginide, von denen ein Derivat des Diarginylvalins ($C_{17}H_{35}N_9O_{15}$) in Kristallen gewonnen werden konnte.

Die Protamine sind starke Basen, deren Eigenschaften in freiem Zustand wenig untersucht worden sind. Sie ziehen Kohlensäure an und bläuen intensiv Lackmus. Sie lassen sich ohne Schwierigkeit mit Säure titrieren, wobei sich ergeben hat, daß die Alkaleszenz des Clupeins ebenso groß ist, wie die des Arginins, welches daraus hervorgeht. Von den Salzen sind die Sulfate am besten getrennt, doch auch die löslicheren Chloride, die Pikrote und andere. Durch Zusatz von gesättigter Kochsalzlösung werden die Salze als Oele abgeschieden.

Durch Erhitzen werden die Protamine nicht koaguliert; dagegen zeigen sie beim Stehen Veränderungen, die auf eine Art Denaturierung schließen lassen. Durch die Alkaloidreagenzien werden die Protamine, nicht nur wie die Histone bei neutraler, sondern auch bei alkalischer Reaktion gefällt, so daß hier die Reihe Eiweiß—Histon—Protamin sehr deutlich ist. Bei schwach ammoniakalischer Reaktion geben Protamine mit Eiweißkörpern und primären Albumosen Niederschläge; Deuteroalbumosen und Peptone geben keine Fällung. Leim gibt unter bestimmten Bedingungen einen Niederschlag. Die Niederschläge haben Aehnlichkeit mit den Histonen.

Durch Pepsin wird das Protamin nicht angegriffen, durch Trypsin, Erepsin und die Fermente von deren Typus dagegen in Aminosäuren oder Protone zerlegt. Die Protamine haben ähnliche toxische Wirkungen wie die Albumosen.

In den unreifen Spermatozoen des Lachses und der Makrele sind, wie bei den Histonen erwähnt wurde, Körper gefunden worden, die nach ihren Reaktionen Histone sind; doch ist freilich zu berücksichtigen, daß ein Gemenge von koagulierbarem Eiweiß und Protamin viele Eigenschaften der Histone zeigen kann. Sind es aber wirklich Histone, so bestünde hier chemisch und genetisch die gleiche Reihe. Das Protamin muß nämlich beim Lachse aus dem Körpereiweiß hervorgehen, weil der Lachs während des Wachstums der Testikel keine Nahrung aufnimmt. Die bedeutenden Mengen Arginin, die zum Aufbau des Salmins erforderlich sind, brauchen dabei nicht neu gebildet zu werden, vielmehr liefert das während dieser Zeit in Verlust gehende Muskeleiweiß reichlich genug Arginin. Doch läßt das Vorkommen des Agmatins im Heringssperma immerhin daran denken, daß die Umsetzung auch über das Arginin hinaus gehen kann.

Genau untersucht sind die drei zu einer Gruppe gehörigen Protamine Salmin, Clupein, Scombrin, ferner das Sturin, weniger vollständig die beiden Cyprinine, das Crenilabrin und das Cyklopterin, sowie das Acipenserin des Scherg (Acipenser stellatus).

Protamine sind enthalten auch in dem Sperma der Bachforelle (Salmo fario), des Schnäpels (Coregonus oxyrhynchus), des Welses (Silurus glanus) und des Hechtes Esox lucius). In Bakterien sind basische, schwefelfreie Eiweiße gefunden worden, die möglicherweise hierher gehören.

Digitized by Google

VI. Die Gerüsteiweiße.
(Früher Albuminoide.)

Unter dem Namen der Albuminoide faßt man seit langem eine Reihe von Eiweißkörpern zusammen, welche die Gerüstsubstanzen der Tiere bilden, also der histologischen Gruppe des Bindegewebes im weitesten Sinne angehören. Sie sind niemals Teile einer tierischen Zelle, sondern sie bilden die Grundsubstanz, in welche die Zellen eingelagert sind. In den Ernährungsflüssigkeiten der Tiere, Blut, Lymphe usw., kommen keine derartigen Körper vor, und ebensowenig in Pflanzen.

Sie sind Eiweißkörper so gut wie die löslichen Eiweiße: sie zerfallen durch Säuren oder Fermente in die gleichen Albumosen, Peptone und Aminosäuren, sie werden durch Halogene substituiert, bilden Salze, haben etwa die gleiche prozentische Zusammensetzung und geben die gleichen Farbenreaktionen. Darum ist es zweckmäßig, den alten Namen Albuminoide oder eiweißähnliche Körper fallen zu lassen, der aus der Zeit stammt, da man den kolloidalen Charakter der Albumine und Globuline als das Wesentliche für den Eiweißbegriff ansah. Die englische Nomenklaturkommission hat den Namen „Scleroproteins" geprägt; hier soll von den „Gerüsteiweißen" die Rede sein.

Chemisch umfaßt die Gruppe die allerverschiedensten Körper. Dem Leim fehlen Tyrosin und Tryptophan, wogegen er sich durch einen hohen Gehalt an Glykokoll, außerdem an Basen und an Prolin auszeichnet. Das Keratin ist von allen Eiweißen am reichsten an Cystin und damit an Schwefel, außerdem reich an Tyrosin; das Elastin nähert sich durch seine Basenarmut einigen Pflanzeneiweißen. Das Fibroin besteht zu mehr als 50% aus Alanin und Glykokoll. Immerhin bedingt die anatomische Zusammengehörigkeit eine Reihe chemischer Eigentümlichkeiten, die allen Gerüsteiweißen gemeinsam sind. Ihre Funktion besteht darin, daß sie dem Körper als Stütze und Decke dienen und dem lebenden Protoplasma der Organe Form und Zusammenhalt verleihen, und sie haben daher alle die physikalische Eigenschaft großer Festigkeit. Dabei kann es sich entweder um die durch Einlagerung von Mineralbestandteilen bedingte außerordentliche Härte der Knochen der Wirbeltiere oder der Schalen der Weichtiere oder anderer zum Schutze dienenden Bedeckungen vieler niederer Tiere handeln, für die meist Gerüsteiweiße die organische Grundsubstanz liefern. Oder es handelt sich um Körper von hoher Elastizität, wie bei den Sehnen und den aus elastischem Gewebe bestehenden Körperteilen; oder endlich es wird nur, wie bei dem gewöhnlichen Bindegewebe, ein gewisser Grad von zähem Zusammenhalten ohne eigentliche Festigkeit verlangt. Eine Eigenschaft müssen aber alle Gerüstsubstanzen haben, und das ist ihre vollständige Unlöslichkeit in allen tierischen Flüssigkeiten.

Alle Gerüsteiweiße sind in Wasser und Salzlösungen ganz unlöslich, meist aber auch in verdünnten Säuren oder Alkalien kaum löslich, sondern sie können nur durch Eingriffe in Lösung gebracht werden, die diese ihre Grundeigenschaft aufheben und von denen wir auch sonst wissen, daß alle Eiweißkörper durch sie zerstört und chemisch verändert werden. Da wir einen chemischen Körper nun nicht wohl anders als in Lösung vollständig untersuchen können, so gehört es zur Charakteristik der Gerüsteiweiße, daß sie im nativen Zustande, wie sie im Körper vorkommen, unzugänglich sind und immer erst, nachdem sie mannigfachen Veränderungen unterworfen wurden, zur Untersuchung kommen. Die Isolierung, die Feststellung der chemischen Individualität, der Eigenschaften und der Zusammensetzung der Albuminoide ist daher noch viel schwerer als bei den Zelleiweißen, die im Protoplasma doch im halbflüssigen, halbgelösten Zustande vorkommen.

Was die physikalischen Eigenschaften der nativen Eiweiße anlangt, ihren kolloidalen Charakter und was damit zusammenhängt, so ist ein Vergleich mit den im festen Aggregatzustande befindlichen Gerüsteiweißen nicht wohl möglich. Nur das leichtest lösliche unter den Gerüsteiweißen, das Kollagen, macht hiervon eine Ausnahme; das aus ihm durch kurzes Kochen entstehende Glutin, der Leim, erstarrt beim Erkalten seiner Lösungen zu einer Gallerte, eine Eigenschaft, die seinen Umwandlungsprodukten nicht mehr zukommt und die daher wohl mit der Löslichkeit der genuinen Eiweiße, die ihnen bei der Denaturierung verloren geht, verglichen werden kann. Auch von dem Molekulargewicht kann bei festen Körpern nicht wohl die Rede sein.

Die Abgrenzung der Gerüsteiweiße gegen die übrigen Eiweiße ist eine scharfe, höchstens könnte man von einigen Uebergängen zu den Mucinen reden, etwa dem Chondromucoid; die Aehnlichkeit beruht indessen nicht auf der chemischen Uebereinstimmung der betreffenden Körper, sondern darauf, daß sie im Organismus zu einer funktionellen Einheit zusammengefaßt sind. Schwieriger ist dagegen die Abgrenzung gegen eine Reihe nicht eiweißartiger Gerüstsubstanzen, die bei niederen Tieren vorkommen, wie das Hyalin, und die chemisch kaum bekannt sind.

Glutin, Keratin, Elastin, Fibroin, Spongin, Koilin, Konchiolin, Amyloid usw. sind gut charakterisierte Stoffe. Eine Anzahl wenig

Digitized by Google

gekannte Körper sind als Albumoide zusammengefaßt.

Eine wesentliche Eigentümlichkeit der Gerüsteiweiße, die ebenfalls durch ihren anatomischen Charakter bedingt ist und die ihre Beschreibung erschwert, ist ihr Altern. Die Zellen werden durch ihren Stoffwechsel fortwährend neu ergänzt und altern nicht; die Zelleiweiße und die löslichen Eiweiße bleiben im Laufe des Lebens der Tiere dieselben. Wohl aber verändert sich im Alter die Zwischensubstanz in erheblicher Weise; sie nimmt an Masse zu und wird fester und härter. Besonders an dem eigentlichen Bindegewebe ist dies deutlich; während junges Bindegewebe überwiegend aus Zellen mit wenig und weicher Grundsubstanz besteht, bildet diese im Alter, etwa bei Narbengewebe, eine derbe, zähe, feste Masse, die mit der Grundsubstanz des jungen Gewebes physikalisch kaum mehr eine Aehnlichkeit hat. Auch bei den anderen Gerüsteiweißen, besonders bei denen, welche die Gerüste oder Schalen der Wirbellosen bilden, spielen diese Altersunterschiede eine Rolle. Dasselbe Gewebe, das im jugendlichen Zustande weich und biegsam war, ist im Alter, zumal wenn noch Kalkeinlagerungen dazu kommen, steinhart. Chemisch ändert es sich dabei nicht, aber die Löslichkeit nimmt mit dem Festerwerden naturgemäß immer mehr ab, so daß Kollagen und Elastin dem Keratin ähnlich werden, während ihre Spaltungsprodukte, ihre Reaktionen und ihre Zusammensetzung die früheren geblieben sind.

1. Kollagen; Leim. Die Fibrillen des gewöhnlichen Bindegewebes, die Grundsubstanz der Knochen und Knorpel, bestehen aus „leimgebendem Gewebe" oder Kollagen. Wenn man dies Kollagen mit kochendem Wasser behandelt, so geht es in Lösung, und diese in Wasser lösliche Substanz nennt man Glutin, Leim oder Gelatine. Die wichtigste Eigenschaft des Glutins ist, daß es beim Abkühlen seiner Lösungen auf Zimmertemperatur zu einer Gallerte erstarrt, die sich beim Erwärmen wieder auflöst, um beim Erkalten von neuem zu entstehen.

Das Kollagen ist naturgemäß wenig bekannt. Das Kollagen des gewöhnlichen Bindegewebes ist in Pepsinsalzsäure sehr leicht löslich, in Trypsin dagegen in unverändertem Zustande unlöslich, was zur Isolierung des Bindegewebes in mikroskopischen Präparaten benutzt wird. Die Unverdaulichkeit des Bindegewebes in Trypsin verwendet man auch zur Prüfung auf das Vorhandensein von Pepsin bei Patienten (Schmidtsche Probe). Man gibt Stückchen rohen Fleisches zu essen, das durch Pepsin ganz gelöst wird. Fehlt das Pepsin aber, so werden die Muskelfasern durch Trypsin gelöst, das Bindegewebsgerüst erscheint aber im Kot. Das Kollagen wird in Trypsin ebenfalls löslich, wenn es in Säuren gequollen und dann durch Erwärmen in Wasser auf 70° wieder geschrumpft ist. In den Sehnen und verwandten Geweben, z. B. dem Ligamentum nuchae kommt Kollagen mit Elastin und Mucin zusammen vor, auch hier in Fibrillen angeordnet.

Aus dem Kollagen entsteht der Leim verschieden leicht, am schnellsten durch Kochen mit Säuren; aber auch anhaltendes Kochen mit Wasser bringt das Kollagen in Lösung. Die Zeit, die hierfür erforderlich ist, wechselt bei den einzelnen Glutinen sehr; leicht löslich ist das Kollagen der Fischschuppen; den Leim aus Trachealknorpel vom Rind oder dem Nasenknorpel des Schweins erhält man durch bloßes Erwärmen auf dem Wasserbade, während der Ohrknorpel vom Schwein Erhitzen auf 110° erforderte. Worin die Umwandlung des leimgebenden Gewebes in Leim ihrem Wesen nach besteht, ist unbekannt.

Das Glutin oder der Leim ist im trockenen Zustande ein farbloses, amorphes Pulver. In der Regel aber kommt er in glasigen noch wasserhaltigen Stücken vor, der bekannten käuflichen Gelatine. Wie bei allen Gerüsteiweißen schwankt die Zusammensetzung, Löslichkeit usw. je nach der Art der Vorbehandlung etwas. Sind doch die Fibrillen stets in Gemenge mit anderen Gewebebestandteilen, aus denen Eiweißkörper u. a. mit dem Leim in Lösung gehen und wenn man durch stärkeres Kochen oder Lösungsmittel diese Beimengungen entfernen will, läuft man dann wieder Gefahr, den Leim zu zersetzen. Gewöhnlich sucht man die Beimengungen zu entfernen, indem man die Gewebe abwechselnd mit verdünnter Säure und verdünntem Alkali in der Kälte behandelt, mit kaltem Wasser wäscht und durch Kochen den Leim in Lösung bringt. Die Analysen ergeben alle einen relativ hohen N-Gehalt (18%) und einen niedrigen S-Gehalt (0,5%); auch der C-Gehalt ist niedrig (49%), was sich in der niedrigen Verbrennungswärme äußert.

Wichtiger sind die Spaltungsprodukte, bei denen die kleinen Differenzen in der Reinheit eine geringere Rolle spielen. (Vgl. Tabelle in Abschnitt 4.) Leim enthält 16 bis 19% Glykokoll, viel Prolin und Lysin, reichlich Arginin, dagegen kein Tyrosin und Tryptophan.

Mit dem hohen Gehalt an Glykokoll, dem Fehlen der Tyrosins und Tryptophans steht die relative Schwerverdaulichkeit des Leims im Einklange. Es liefert Antipepton in guter Ausbeute, ebenso Pepsinalbumosen und Kyrin.

Digitized by Google

Salpetersäure fällt nicht, ebensowenig die meisten Schwermetalle; die Niederschläge mit Platinchlorid, Zinnchlorid sind in der Siedehitze löslich, und kehren beim Erkalten zurück, ebenso die mit Gerbsäure und Pikrinsäure. Der Niederschlag mit Phosphorwolframsäure ist hitzebeständig. Ferrocyankalium und Essigsäure geben mit Leim außer bei besonderen Bedingungen keine Fällung, was seit Alters als charakteristisch gilt. Bei der Fällung des Leims mit Gerbsäure ist (vgl. Abschnitt 9 und 11) ein bestimmtes optimales Verhältnis nötig. Eine vollständige Fällung kommt nur zustande, wenn Leim und Gerbsäure im Verhältnis 1:0,7 vorhanden sind. Bei einem Ueberschuß von einem der beiden Bestandteile löst sich der Niederschlag teilweise wieder auf. Locker vermag Leim aber nicht nur diese, sondern die dreifache Menge Tannin zu binden. Dem frischgefällten Leimtannat entzieht Alkohol einen Teil des Tannins, ist der Niederschlag aber einmal getrocknet, so ist er unzersetzlich geworden, und gibt auch an Alkohol keine Gerbsäure ab. Auf der Bildung dieses beständigen, nicht zersetzlichen, kaum angreifbaren Leimtannats beruht bekanntlich das Gerben der Haut zu Leder.

Der Leim ist in kaltem Wasser, in Salzlösungen, Säuren und Alkalien unlöslich, quillt aber darin auf. Die Quellung ist in Säuren und Alkalien viel stärker als in reinem Wasser; das Aufquellen der Haut in alkalischen Lösungen ist ja bekannt.

In heißem Wasser ist der Leim äußerst leicht löslich; eine derartige Lösung erstarrt beim Abkühlen zu einer Gallerte, die je nach der Konzentration die derbe Konsistenz des Tischlerleims besitzt oder dünn und zitternd ist. Reine Gelatine erstarrt, je nach der Konzentration, bei 18 bis 25°, beim Erwärmen schmilzt sie bei 26 bis 29°. Der Schmelz- und Erstarrungspunkt wird aber durch Salze und durch organische Kristalloide beeinflußt. Diese Fähigkeit, zu gelatinieren, kommt nur dem unveränderten Leim zu, nicht aber seinen Umwandlungsprodukten, den Gelatosen oder Glutosen, oder dem Glutinpepton. Wenn eine Leimlösung daher mit irgendwelchen Mitteln behandelt wird, durch die Eiweißkörper in Albumosen gespalten werden, so verliert sie die Fähigkeit, zu erstarren. Dies geschieht durch Kochen mit Wasser mit oder ohne erhöhten Druck ferner durch Kochen mit Säuren und Alkalien, durch die Pepsin- und die Trypsinverdauung und die Fäulnis. Aber noch bevor es zu dieser Spaltung kommt, tritt ein Stadium ein, in dem Leimlösungen sonst unverändert sind, aber nicht mehr gelatinieren, ein Zustand, den man der Denaturierung des Eiweiß ohne weitergehende Spaltung vergleichen kann. Bei Körpertemperatur gehaltene Leimlösungen verlieren ihre Gelatinierfähigkeit in der Regel ziemlich rasch, oft in 1 bis 2 Tagen.

Durch trockenes Erhitzen verliert Gelatine umgekehrt ihre Löslichkeit in warmem Wasser.

Bei subkutaner, noch mehr bei intravenöser Injektion kommen dem Leim gewisse Giftwirkungen zu. Es kommt zu Sopor, Temperaturerniedrigung und Tod. Außerdem beschleunigt er die Blutgerinnung.

Hornhaut- und Fischschuppenkollagen. Das bisher geschilderte Glutin ist das aus Bindegewebe oder Sehnen gewonnene. Genau so verhält sich das Kollagen in Hornhaut und Sclera und das aus den Fischschuppen.

Die Hornhauttrockensubstanz besteht zu 80%, die der Sclera zu 87% aus Kollagen. Der Rest kommt größtenteils auf Mucoid. Die Linse und die übrigen Teile des Auges enthalten kein Kollagen.

Die Fischschuppen bestehen zu $^1/_5$ aus dem Ichthylepidin (siehe unten), zu $^4/_5$ aus Kollagen, das sich durch die Leichtigkeit auszeichnet, mit der es zu Glutin wird.

Wenn man Muskeln in Wasser kocht, geht Glutin oder Gelatosen in Lösung, finden sich daher im käuflichen Fleischextrakt.

Knorpelkollagen. Die Grundsubstanz des Knorpels besteht aus einem Gemenge von Kollagen und einem Mucoid, dem Chondromucoid. Außerdem ist im Knorpel ein Bestandteil der Chondromucoids, die Chondroitinschwefelsäure, noch frei enthalten, und ferner noch ein Gerüsteiweiß (Albumoid, siehe unten), das sich aber nur in altem Knorpel findet.

Das Balkennetz der älteren Knorpel besteht aus diesem Gerüsteiweiß und Kollagen, die davon umschlossenen, durch anderes Verhalten gegen Farbstoffe sich abhebenden Chondrinballen aus Kollagen und Mucoid. Durch verdünnte Säuren bei 40° wird aus dem Knorpel ein Gemenge von Glutin mit Chondroitinschwefelsäure, durch Kochen im Papinschen Topf ein solches von Glutin, Mucoid und der Säure erhalten. Dies Gemenge wird zum Unterschiede von gewöhnlichem Glutin nicht durch Tannin gefällt, weil die Chondroitinschwefelsäure die Eigenschaft besitzt, die Fällung zu verhindern.

Knochenkollagen. Ossein. Die Grundsubstanz des Knochens besteht größtenteils aus Kollagen und Kalksalzen, die in dieses eingelagert sind. Außerdem enthält er ein Albumoid (siehe unten) und ein Mucoid, das dem Chondromucoid ähnelt (siehe unten). Die Bildung des Knochenleims aus dem Kollagen scheint schwer zu sein. Das Ossein, d. h. entkalkter Knochen, wird

Digitized by Google

von Pepsin so leicht gelöst wie anderes Glutin.

Auch Bindegewebe von Wirbellosen besteht, soweit untersucht, aus Kollagen, der Seidenleim gehört aber nicht hierher.

2. Keratin. Das Keratin bildet die Hornsubstanzen des menschlichen und tierischen Körpers, also die verhornten oberen Schichten der Epidermis, die Haare, Federn, Nägel, Hufe, Hörner usw. Das sogenannte Neurokeratin bildet einen Teil der Scheide der markhaltigen Nerven. Auch der organische Bestandteil der Eierschalen ist ein Keratin.

Das Keratin ist von allen Albuminoiden wohl das unlöslichste. Es ist in Wasser, verdünnten Säuren und Alkalien ganz unlöslich, selbst Kalilauge von 10% löst nur in der Hitze; in der Kälte ist eine Lauge von 20% zur Lösung erforderlich, und dann ist das Keratin natürlich ganz zersetzt. Auch die Verdauungsfermente vermögen Keratin kaum aufzulösen. Auf welche Weise die Raupe der Pelzmotte sich ihre Nahrung verschafft, ist nicht bekannt. Eine Kenntnis der Löslichkeit usw. des Keratins als solchen ist daher unmöglich; andererseits sichert gerade die vollständige Unlöslichkeit des Keratins eine gewisse Genauigkeit seiner Analysen. Denn durch aufeinanderfolgende Behandlung mit Säuren, Alkalien, Pepsin und Trypsin lassen sich schließlich alle anderen Eiweißstoffe usw. entfernen, und es bleibt reines Keratin zurück.

Bei der Analyse war am auffallendsten immer der hohe S-Gehalt, der bei Menschenhaaren bis 6,3, bei anderen Haaren und Eierschalen wenigstens auf 4,3% steigt, und bei Hörnern und Klauen auch noch 2,6 bis 3% beträgt. Dabei enthält auch das Keratin kein anderes S-haltiges Spaltungsprodukt als das Cystin, das demnach 20% des Moleküls ausmachen muß. Bei der Säurespaltung erhält man freilich immer nur einen Teil, da sich das Cystin unter Bildung von Schwefel, Schwefelwasserstoff, Ammoniak und Humin zersetzt. Sonst ist noch der relativ hohe Gehalt an Glutaminsäure zu erwähnen. Tyrosin ist reichlich vorhanden, doch nicht mehr als etwa im Casein, Glykokoll nur in geringer Menge, ebenso die Basen. (Vgl. Abschnitt 4, Tabelle.)

An den Keratinen sind Untersuchungen darüber angestellt worden, ob die Keratine verschiedener Herkunft verschiedene Mengen Bausteine enthalten, mit dem Ergebnis, daß die Zusammensetzung der einzelnen Keratine verschieden sein muß; man müßte denn annehmen, daß etwa die Menschenhaare reines Keratin seien, die anderen Hornsubstanzen andere Eiweißkörper beigemengt enthielten, wofür anatomisch kein Anhaltspunkt vorliegt.

Für Pepsin und Trypsin ist das Keratin im allgemeinen nicht angreifbar; sogar die dünnen Haare passieren den Verdauungskanal des Hundes unverändert. Nur junges Keratin ist etwas angreifbar. Die durch überhitzten Dampf gebildeten Stoffe, das Atmidkeratin und die Atmidkeratosen, sind dagegen verdaulich.

Der Nachweis des Keratins gründet sich darauf, daß die Millonsche und besonders die Schwefelbleireaktion sehr stark ausfallen, und daß die Substanz in Säuren und Alkalien unlöslich und gegen Pepsin und Trypsin resistent ist. Auf Grund dieser Definition ist von jeher außer den eigentlichen Hornsubstanzen auch die organische Grundsubstanz der Schale des Hühnereies zu den Keratinen gerechnet worden, auch die Eischale eines eierlegenden Säugetiers, des Ameisenigels (Echidna histrix), und die Eierschale des Krokodils besitzen die physikalischen Eigenschaften des Keratins und enthalten 5% Schwefel. Auch bei dem Echidna-Keratin hängt die Resistenz gegen Pepsin vom Alter ab. Eine Reihe anderer Eischalen enthält dagegen Eiweißkörper, die keinen besonders hohen Schwefelgehalt besitzen und die keine Keratine sind. Untersucht sind die Eierschalen von Schildkröten, Schlangen und verschiedenen Haifischen. Es fand sich reichlich Tyrosin, wenig basischer Stickstoff, und bei der Untersuchung der Aminosäuren wenig Charakteristisches.

Das sogenannte Neurokeratin ist trotz seiner Anordnung in äußerst dünner Schicht noch resistenter, selbst gegen recht starke Alkalien, als das Keratin der Epidermis, und bleibt daher zurück, wenn man Nervengewebe nacheinander mit Alkohol, Aether, Säuren, Alkalien und Fermenten behandelt. Man erhält es als ein hellgelbes Pulver, das alle Eiweißreaktionen gibt. Die Analysen ergaben einen auffallend hohen Kohlenstoff-, einen etwas niedrigeren Schwefelgehalt als bei dem anderen Keratin. Unter den Spaltungsprodukten findet sich viel Tyrosin, wenig Histidin, etwas mehr Lysin und Arginin; er liefert auch viel Humin. Das Neurokeratin bildet einen Teil der Scheide der markhaltigen Nerven der Wirbeltiere und kommt daher in Gehirn, Rückenmark, Retina und in peripheren Nerven reichlich vor; im Zentralnervensystem macht es etwa 15 bis 20% der von den Myelinsubstanzen befreiten Trockensubstanz aus, im N. ischiadicus 0,3% des frischen Nerven. Im Bauchstrang des Hummers findet sich kein Neurokeratin, dafür Chitin. Aufgeführt sei hier auch das Koilin. Es bildet die äußerst feste und harte Hornschicht, die den Muskelmagen der körnerfressenden Vögel auskleidet. Es ist ein erhärtetes Drüsensekret. Nach seiner Zusammensetzung hat das Koilin

Digitized by Google

nichts mit den Keratinen zu tun, es ähnelt ihnen nur darin, daß es unverdaulich ist, und durch Alkalien und Säuren nur beim Sieden gelöst wird.

3. Elastin. Das Elastin bildet, in Fasern angeordnet, das elastische Gewebe, sei es zu einem dicken, derben Strang vereinigt, wie in dem oft untersuchten Ligamentum nuchae des Ochsen, sei es zu flächenhaften Gebilden ausgebreitet, wie in den Fascien und der Wand der Aorta, sei es endlich in einzelnen Fibrillen in anderes Bindegewebe eingefügt, wie in den Sehnen und dem gewöhnlichen Bindegewebe.

Das Elastin ist nicht viel leichter löslich als das Keratin; in der Kälte wird es von 5 prozentiger Säure nicht, von 1 prozentiger Kalilauge selbst in der Hitze kaum angegriffen. Dagegen wird es von Pepsin-Salzsäure wie von Trypsin verdaut und, wenn auch langsam, in Albumosen zerlegt. Die Reindarstellung besteht wie bei dem Keratin darin, daß Eiweiß, Leim und andere Körper durch wechselnde Behandlung mit Säuren und Alkalien in Hitze und Kälte entfernt werden und das Elastin zurückbleibt.

Die Analysen ergeben einen auffallend hohen C-Gehalt und einen äußerst niederen S-Gehalt (Spaltungsprodukte vgl. Abschnitt 4). Unter den Spaltungsprodukten macht Glykokoll über 25% aus, Leucin ist reichlich vorhanden, auch Alanin und Phlenylalanin; Tyrosin findet sich nur in Spuren, fehlt vielleicht ganz. Auch Tryptophan fehlt. Die 3 Basen sind vorhanden. Ueber das Hemielastin siehe Abschnitt 8.

4. Fibroin und Seidenleim. Die von der Seidenraupe gesponnenen Fäden bestehen aus Fibroin, das von einer leimartigen Hülle umgeben ist. Die Rohseide ist daher abgesehen von Salzen usw. ein Gemenge von Fibroin und Seidenleim oder Sericin. Lombardische Rohseide liefert gegen 70% Fibroin, der Rest ist Leim. Andere Seiden liefern meist weniger Leim (siehe unten). Auch technisch degommierte Seide enthält noch über 5% Leim.

Der Seidenleim hat die Löslichkeitsverhältnisse des Glutins. Das Fibroin ist dagegen in Wasser, auch überhitztem, in verdünnten Säuren und Alkalien unlöslich, und man hat daher das Auskochen der Seide im Papinschen Topfe von jeher zur Trennung ihrer Bestandteile benutzt.

Durch Kochen der Seide bei streng neutraler Reaktion erhält man das Fibroin unverändert. Es besitzt noch die Festigkeit des Seidenfadens, aber nicht mehr den vollen Glanz und die Weichheit; auch ist die Hygroskopizität vermindert. Durch Säuren und Alkalien wird es dagegen zersetzt und in eine brüchige Masse verwandelt. Starke, kalte Salzsäure löst, und aus dieser Lösung läßt sich durch Alkali ein Albuminat gewinnen, das Sericoin, das beträchtlich weniger Stickstoff enthält. Daneben entstehen Albumosen und Peptone. Pepsin und Trypsin greifen Fibroin nicht an, auch im Darm der Säugetiere werden Seidenfäden, selbst in Monaten, nicht gelöst. Leukocyten zerstören es dagegen schließlich.

Der Seidenleim verhält sich in bezug auf die Löslichkeit usw. ähnlich wie Glutin. Die Untersuchung der Spaltungsprodukte hat aber ergeben, daß Seidenleim weder mit Leim noch mit Fibroin etwas zu tun hat.

Von großem Interesse ist der Aufbau des Fibroins aus seinen Bausteinen (vgl. Tabelle in Abschnitt 4). Es weicht danach erheblich von den übrigen Eiweißen ab, da es zu mehr als der Hälfte aus Glykokoll und Alanin besteht und 10% Tyrosin enthält. Leucin, Glutamin- und Asparaginsäure treten dagegen stark zurück, und ebenso die Basen, von denen Lysin und Histidin nicht einmal ganz sicher gefunden sind. Ammoniak ist nur in Spuren vorhanden. Cystin und Schwefel scheinen zu fehlen. Infolge der beschränkten Zahl der Bausteine ist das Fibroin relativ weitgehend aufgelöst.

An dem Fibroin sind systematische Untersuchungen darüber angestellt worden, ob die Eiweißkörper des gleichen Gewebes bei nahestehenden Arten oder Rassen identisch sind oder nicht. Der Tyrosingehalt ist recht konstant, der Gehalt an Alanin und besonders an Glykokoll weist dagegen so bedeutende Differenzen auf, daß die einzelnen Fibroine jedenfalls nicht identisch sein können. Die Analysen des Fibroins weisen einen hohen N- und niedrigen C-Gehalt auf.

Dem Fibroin ähneln in seiner Zusammensetzung die Spinnenfäden, das Gespinst der großen Spinne Nephila madagascariensis. Auch der Byssus der Muschel Pinna nobilis, der aus seidenartigen Fäden besteht, gehört hierher. Der physikalischen Aehnlichkeit entspricht hier also der chemisch ähnliche Bau. Auch das Elastin hat ja eine gewisse Aehnlichkeit mit dem Fibroin und enthält wenigstens viel Glykokoll, wenn auch weniger Alanin.

5. Spongin. Gorgonin. Die Gerüstsubstanzen der Schwämme und Korallen sind Halogeneiweiße und werden bei diesen besprochen. Das Spongin des Schwammes enthält viel Glykokoll, Prolin, Glutaminsäure, Lysin und Arginin, das Gorgonin der Edelkoralle enthält dagegen kein Glykokoll. Cystin ist vorhanden, aber nicht viel, so daß eine Zugehörigkeit zu den Keratinen, an die man wegen der Härte und Schwerlöslichkeit gedacht hat, nicht besteht. Spongin löst sich besonders leicht in Kupferoxydammoniak.

6. Konchiolin. Die Schalen der Schnek-

Digitized by Google

ken enthalten massenhaft Kalksalze. Nach ihrer Entfernung bekommt man elastische Häute, die etwa 1% der Schalen ausmachen. Sie werden als Konchiolin bezeichnet. Dieses ist in Säuren und in überhitztem Wasser nur schwer löslich, ziemlich leicht dagegen in Alkalien, wenigstens verhält sich das junge Konchiolin so, das alte ist nach Voit viel unlöslicher.

Tyrosin ist reichlich vorhanden, auch Glykokoll und die Basen sind nachgewiesen. In den Muschelschalen ist das Konchiolin in deutlichen Lamellen angeordnet, die verschieden gefärbt sind, aber keine erheblichen chemischen Differenzen zeigen.

7. Amyloid. Das Amyloid ist eine Substanz, die dem normalen Körper fremd ist, und die sich nur unter pathologischen Verhältnissen bildet. Es kommt in zweierlei Gestalten vor, einmal in Form der sogenannten Corpora amylacea im Gehirn und an anderen Orten, dann aber in massenhaften Ablagerungen von amyloider Substanz in dem Parenchym der Leber, Milz, Niere usw. bei der Amyloiddegeneration oder speckigen Entartung dieser Organe, wie sie bei chronischen Eiterungen, Kachexien usw. auftritt. Das Amyloid bildet hier glänzende, homogene Schollen; bei massenhafter Entwickelung sind die Organe vergrößert, derb, fast holzartig und sehen eigentümlich speckig und glasig aus. Es soll regelmäßig in der gesunden Aorta, gelegentlich auch in altem Knorpel ein Körper vorkommen, der die Eigenschaften des Amyloids zeigt; danach wäre das Amyloid kein ausschließlich pathologisches Produkt.

Charakteristisch für das Amyloid sind einige Farbenreaktionen:

1. Mit einer Jodjodkaliumlösung färbt es sich nicht hellgelb wie anderes Gewebe, sondern dunkelbraunrot oder mahagonibraun; behandelt man das mit Jod gefärbte Amyloid mit Schwefelsäure oder mit Chlorzinklösung, so wird es noch dunkler braun oder feuerrot oder violett oder mehr blau oder grün; mitunter tritt auch schon bei der Behandlung mit Jodlösung allein eine Violettfärbung auf.

2. Mit Methylviolett färbt sich das Amyloid schön rubinrot, mitunter auch mehr rosa oder rotviolett, nicht blau oder blauviolett wie die normalen Gewebe.

Zur Darstellung hat man die sorgfältig zerkleinerten Organe (Milz und Niere) mit viel 0,1- bis 0,2 prozentigem Ammoniak von Nucleinsubstanzen und anderem Eiweiß befreit, den Rückstand gut mit Wasser gewaschen, das im Rückstand befindliche Amyloid mit 0,5- bis 1 prozentigem Barytwasser in 10 bis 15 Minuten gelöst, mit Salzsäure ausgefällt, mit Wasser gewaschen und mit Alkohol und Aether getrocknet. Normale Organe enthalten kein Eiweiß, das sich in Barytwasser von 0,5% löst, und in Ammoniak von 0,2% nicht. Indessen hat man in früherer Zeit, in der langdauernde Eiterungen häufiger waren als heute, anscheinend viel mächtigeres und darum schwerer lösliches Amyloid in Händen gehabt.

Das Amyloid ist in kaltem Wasser und Salzlösungen ganz unlöslich, durch tagelanges Erhitzen mit Wasser geht es auch nur zum Teil in Lösung, leichter durch Erhitzen unter Druck. In Säuren löst sich derbes Amyloid nur sehr schwer, fein verteiltes leichter; dasselbe gilt von Pepsin. Durch vorhergehende Einwirkung von Natronlauge wird die Verdaulichkeit für Pepsin erhöht. Durch Pepsin entstehen Albumosen und Peptone, die beide Farbenreaktionen des Amyloids noch sehr schön, zum Teil ausgesprochener als die Muttersubstanz geben.

Von den Spaltungsprodukten sind die Basen genauer untersucht, sie sind nicht in besonderer Menge vorhanden.

8. Ichthylepidin. In den Fischschuppen findet sich zusammen mit einem Kollagen ein besonderes Eiweiß, das Ichthylepidin. Es bildet etwa 20% der gewöhnlichen Schuppen der Teleostier, fehlt dagegen bei den Ganoidschuppen. Bei Teleostiern fehlt es nur in den Schuppen der Schleie. Der N-Gehalt ist niedrig, Glykokoll ist vorhanden, sonst bieten die Spaltungsproukte nichts Besonderes. Es ist in Wasser unlöslich, auch beim Kochen, selbst mit überhitztem Wasserdampf nur teilweise löslich. In verdünnten Säuren und Alkalien ist es in der Hitze, in konzentrierten auch in der Kälte löslich. Pepsin und Trypsin lösen es auf.

9. Andere Gerüsteiweiße (Albumoide). Unter dem Namen Albumoide, der eigentlich nur ein seltener gebrauchtes Synonym für Albuminoide ist, sollen eine Anzahl Substanzen zusammengefaßt werden, die sonst nicht unterzubringen sind, und die eine Reihe gemeinsamer Eigenschaften haben Sie bilden die Membranae propriae mancher Drüsen, die Glasmembranen und ähnliches, das Sarkolemm, den festen Bestandteil der Linse usw. Chemisch ist über diese Körper meist herzlich wenig bekannt, vor allem, weil sie meist in sehr geringer Menge vorhanden sind.

In Bezug auf Löslichkeit und Verdaulichkeit erinnern sie an das leimgebende Gewebe, von dem sie sich aber dadurch scharf unterscheiden, daß sie kein Glutin liefern. Sie bleiben zurück, wenn man aus einem Gewebe alle in Wasser, Salzlösungen oder verdünnten Alkalien löslichen Eiweißkörper herauslöst.

Das Sarkolemm, aus dem die Hüllen der Muskelfasern bestehen, unterscheidet sich dadurch von den Bindegewebsfibrillen, das es von Trypsin ohne weitere Vorbereitung verdaut, dagegen durch Osmiumsäure unverdaulich gemacht wird. Ebenso verhält

Digitized by Google

sich der häutige Teil der Schwannschen Scheide, sehr ähnlich die Membranae propriae der Harnkanälchen, der Magendrüsen und des Pankreas, sowie die Substanz, aus der die Linsenkapsel und die Descemetsche Membran bestehen. Die letztere wird als Membranin bezeichnet.

In Knorpel und Knochen findet sich ein solches Albumoid, das zurückbleibt, wenn alles lösliche Eiweiß, Mucoid und Glutin entfernt wird. Ein anderes Albumoid bildet zusammen mit den Kristallinen die Linsenfasern. Bei den Linsen von ausgewachsenen Rindern bildet das Albumoid 48% der Eiweißkörper, 17% der frischen Linse; seine Menge hängt indessen vom Alter ab; in den inneren, älteren Schichten ist es viel reichlicher vorhanden als in den jungen äußeren.

Die Chorda dorsalis der Knorpelfische, ein an festen Bestandteilen sehr armes Gewebe, enthält weder Glutin noch ein Mucin oder Mucoid, dagegen einen Eiweißkörper, der sich in Alkalien ziemlich leicht löst, von Säuren gefällt wird und durch Pepsin leicht verdaut werden kann.

Mit dem Namen Retikulin bezeichnet man einen Körper, der zusammen mit Kollagen das retikuläre Gewebe der Darmmucosa bildet. Es ist phosphorhaltig.

Ferner gehört zu den Albumoiden die früher für Chitin gehaltene Cuticula des Regenwurms.

B. Umwandlungsprodukte.

Die Umwandlungsprodukte wurden im allgemeinen Teil besprochen.

C. Die Proteide oder die zusammengesetzten Eiweißkörper.

Die Proteide sind Verbindungen eines oder mehrerer Eiweißkörper mit einem Körper, der kein Eiweiß ist, einer „prosthetischen Gruppe". Diese letztere bedingt ihre besonderen Eigenschaften und ihre Einteilung.

Die sehr reaktionsfähigen Eiweißkörper gehen mit vielen chemischen Stoffen Verbindungen ein, die in §§ 9 und 10 beschrieben sind. Auch aus den Geweben und Körperflüssigkeiten lassen sich Verbindungen des Eiweiß mit Lecithin in Lösung bringen, die unter dem Namen Lecithalbumin beschrieben sind. Auch von Lipoproteiden ist gesprochen worden. Hier sollen nur die 4 Gruppen eingehender besprochen werden, die bisher als gut gekannte Individuen in der Natur aufgefunden sind, die Phosphoproteide, die Nucleoproteide, die Glykoproteide und die Hämoglobine und Verwandte.

I. Die Phosphoproteide.

Die Phosphoproteide sind phosphorhaltige saure Eiweißkörper. Sie sind anfangs mit den ebenfalls phosphorhaltigen sauren Nucleoproteiden zusammengeworfen worden, mit denen sie das eigentümliche Verhalten gegen Pepsinsalzsäure gemeinsam haben. Als dann die Nucleinsäure, der charakteristische Paarling der Nucleoproteide, entdeckt wurde, trennte man die beiden Gruppen, behielt aber für die hier zu besprechende Gruppe den Namen Nucleoalbumine (im Gegensatz zu den Nucleoproteiden) bei. Erst allmählich ergab sich, daß die Nucleoalbumine den Nucleoproteiden recht fern stehen, und man nennt sie daher heute Phosphoproteide.

Das am meisten untersuchte Glied der Gruppe ist das Casein. Ferner gehören dazu die Vitelline aus Eiern, eine Anzahl Phosphoproteide, die physikalisch zu den Schleimsubstanzen gehören, und Phosphoproteide aus dem Zellprotoplasma drüsiger Organe. Die Phosphoglykoproteide werden bei den Glykoproteiden besprochen.

Behandelt man die Phosphoproteide mit 1 prozentiger Natronlauge, so wird ihr gesamter Phosphor als Phosphorsäure, PO_4H_3, abgespalten. Die Phosphorsäure muß demnach bis auf weiteres als die „prosthetische Gruppe" dieser Eiweißkörper angesehen werden. Ueber die Art und Weise, wie sie mit dem Eiweiß vereinigt ist, weiß man nichts, ebensowenig darüber, ob sie nicht etwa erst aus einem anderen Körper hervorgeht. Doch unterscheidet sich der Phosphor der Phosphoproteide hierdurch leicht von allen anderen organischen Phosphorverbindungen, die im Körper vorkommen, und kann auf diese Weise gut bestimmt werden. Durch Säure findet diese Abspaltung von Phosphorsäure nicht statt, auch nicht durch stärkere Säuren. Trypsin spaltet Phosphorsäure ab, aber nur einen kleinen Anteil, der Rest wird in einen wasserlöslichen, noch unbekannten organischen Körper verwandelt, aus dem durch Alkali die Phosphorsäure weniger leicht abgespalten wird, als aus dem ursprünglichen Phosphoproteid.

Ein wichtiges Charakteristikum der Phosphoproteide ist ihr Verhalten gegen Pepsinsalzsäure, die aus den Phosphoproteiden einen unlöslichen, phosphorhaltigen Komplex abspaltet, und daher, während der Rest des Eiweiß peptonisiert wird, einen Niederschlag entstehen läßt. Die Ausscheidung ist häufig nur vorübergehend, und geht durch wirksames Pepsin wieder in Lösung. — Eine derartige Ausscheidung läßt sich auch bei den Nucleoproteiden beobachten; sie besteht dort aus der Nucleinsäure in Verbindung mit einer gewissen Menge von Eiweiß, und wird Nuclein genannt. Die entsprechende Ausscheidung bei den Phosphoproteiden ist infolgedessen Paranuclein, Pseudonuclein oder Paranucleinsäure genannt worden. Der Körper enthält 3 bis 4% P und ist eine ausgesprochene Säure, die sich in Alkali

Digitized by Google

löst und durch Säuren gefällt wird. Bei dem meist untersuchten Casein ist die Menge des Pseudonucleins gering, bei den anderen Körpern anscheinend größer, bei einem Ichthulin werden 10 bis 15% des Eiweiß von Pepsinsalzsäure gefällt.

Die Phosphoproteide sind ausgesprochene Säuren; sie röten Lackmuspapier, sind in Wasser als solche nicht löslich, sehr leicht dagegen in Form ihrer Salze mit Alkalien oder Ammoniak; durch Säuren werden sie aus diesen Lösungen frei gemacht und gefällt. Die Lösungen ihrer Salze sind nicht koagulierbar und können daher ohne Veränderung gekocht werden. Im übrigen geben sie die gewöhnlichen Fällungsreaktionen der Eiweißkörper. Beim Liegen in nicht gelöstem Zustande werden sie nicht unlöslich; auch sind sie gegen Säuren relativ resistent, durch Alkalien werden sie dagegen leicht zersetzt und verändert.

Dabei sind die Phosphoproteide indessen wie alle Eiweißkörper amphotere Elektrolyte, und bilden auch mit Säuren Salze. Essigsäure löst in der Regel erst in einem starken Ueberschuß, Salzsäure dagegen schon bei einer Konzentration von 0,5 bis 1%, was zur Trennung von anderen sauren Eiweißen, z. B. den Mucinen, benutzt worden ist, die erst von stärkeren Säuren gelöst werden.

1. Das Casein. Das Casein ist der hauptsächliche, charakteristische Eiweißkörper der Milch. Die Caseine verschiedener Tiere sind nach Löslichkeit, Fällbarkeit und Spaltbarkeit verschieden, wie weit sie es auch in Zusammensetzung und Spaltungsprodukten sind, erscheint noch fraglich.

Das Casein aus Kuhmilch hat folgende Zusammensetzung: C 52,96%, H 7,05%, N 15,65%, S 0,758%, P 0,847%. Die Verbrennungswärme ist 5687 cal. Spaltungsprodukte siehe Tabelle im Abschnitt 4. Die Caseine aus Ziegen- und Frauenmilch zeigen recht ähnliche Mengen der Spaltungsprodukte.

Bemerkenswert ist das Fehlen des Glykokolls und der hohe Gehalt an Tyrosin und Tryptophan. Es hängt damit zusammen, daß das Casein durch Pepsin und Trypsin sehr leicht zerlegt wird; auch wird es als einziges natives Eiweiß von Erepsin angegriffen. Trypsin läßt nur einen kleinen Teil, höchstens 15%, ungespalten. Die Millonsche Reaktion und die Tryptophanreaktionen sind besonders stark, die Schwefelbleireaktion schwach.

Ueber die Salze des Caseins mit Basen gilt das in Abschnitt 9 Gesagte, daß es wegen der Hydrolyse unmöglich ist, bestimmte Aequivalenzverhältnisse zu bestimmen. Doch lassen sich einigermaßen deutlich zwei Reihen von Salzen, neutrale und saure, unterscheiden. Die neutralen Natrium- und Ammoniumsalze sind sehr leicht löslich, die sauren Salze sind ebenfalls löslich, doch sind die Lösungen stark opaleszent. Caseinsaures Calcium ist wesentlich schlechter, doch noch leidlich löslich, die Lösung hat aber eine ausgesprochen weiße, „milchige“ Farbe: caseinsaures Baryum ist noch schlechter löslich. Das Eucasein ist Caseinammonium, die Nutrose und das Plasmon Caseinnatrium.

In der Milch ist das Casein als Caseincalcium enthalten und steht dabei in Verbindung mit phosphorsaurem Kalk. Die Art dieser Beziehung ist noch unaufgeklärt. Das Caseincalcium kann als solches die Eigentümlichkeit haben, das gleichzeitig in der Milch vorhandene neutrale Calciumphosphat irgendwie in Lösung oder in fein suspendiertem Zustande zu erhalten, oder es kann in der Milch ein eigentliches Doppelsalz von Caseincalcium und Calciumphosphat vorliegen; jedenfalls fällt bei jeder Caseinfällung das Calciumphosphat mit aus, und ebenso das gesamte Milchfett, dessen Emulsion auch durch das Caseincalcium vermittelt wird. Es ist daher außerordentlich schwer, das Casein von Fett und von phosphorsaurem Kalk zu befreien. Um die einzelnen Fettkügelchen der Milch befindet sich eine Hülle, an deren Bildung auch die anderen Eiweißkörper der Milch beteiligt sind. Beim Kochen der Milch verändert sich das Casein vermutlich nicht, die Hautbildung beruht wohl auf der Koagulation der beiden anderen Eiweißkörper der Milch. Doch sind diese Dinge noch wenig aufgeklärt.

Aus den Lösungen dieser Salze, also auch aus der Milch wird das Casein durch Mineralsäuren in sehr geringer, durch Essigsäure in stärkerer Konzentration gefällt und im Ueberschusse gelöst; auch Kohlensäure fällt. Die Darstellung des Caseins geschieht so, daß man verdünnte Milch mit Essigsäure fällt, den Niederschlag in verdünntem Ammoniak oder Natriumkarbonat unter Vermeidung alkalischer Reaktion löst und das Verfahren mehrmals wiederholt. Dann wird das Casein mit Alkohol und Aether gründlich von Fett befreit und nochmals mit Essigsäure und Soda behandelt. Die Entfettung kann man sich sehr erleichtern, wenn man statt der Vollmilch die fabrikmäßig entfettete Magermilch benutzt.

Eine Hitzekoagulation zeigt das Casein, wie erwähnt, nicht, denn die Lösungen seiner Salze können, ohne eine Veränderung zu erleiden, gekocht werden. Beim trockenen Erhitzen auf 120 bis 130° verliert es seine Löslichkeit. Präparate, die sehr gründlich gereinigt und entfettet sind, sind bisweilen für die Verdauungsfermente auffallend schwer angreifbar.

Zu den gewöhnlichen Fällungsmitteln der Eiweißkörper kommt hier noch der

Digitized by Google

Kalialaun, der bei geeigneter Konzentration das Casein in der Milch ohne die anderen Eiweißkörper ausfällt. Die Gesamteiweiße der Milch werden durch Eintragen von Kupferoxydhydrat oder durch Tannin gefällt.

Das Casein und seine Salze werden durch Kochsalz, durch Magnesiumsulfat und Natriumsulfat ausgesalzen, wenn die Flüssigkeit völlig gesättigt ist. Die Grenzen für Ammonsulfat sind für die Hauptmasse des Caseins 2,2 und 3,6. Ferner wird Caseincalcium gefällt, wenn man die Lösung mit Chloroform behandelt, oder wenn man viel Tierkohle oder gebrannten Ton in die Lösung einträgt; es fällt auch schon bei der Berührung mit einer Tonwand aus, so daß beim Durchsaugen von Milch durch Chamberlainfilter das Casein zurückbleibt, die anderen Eiweißstoffe ins Filtrat gehen. Caseinnatrium läßt sich durchfiltrieren.

Wirken Pepsin und Salzsäure oder andere eiweißlösende Fermente auf Casein in Gegenwart von Kalksalzen ein, so kommt es zu einer Gerinnung. Bei geringer Konzentration scheiden sich Flocken ab, bei hohem Gehalt an Casein, wie er z. B. in der Kuhmilch vorliegt, wird die Lösung fest und scheidet sich später in einen festen Kuchen, den Käse, der bei der Milch außer dem Casein auch den phosphorsauren Kalk und das Fett enthält, und eine Flüssigkeit, die sogenannte Molke, die bei der Milch die beiden anderen Eiweißkörper der Milch, den Milchzucker und die löslichen Salze enthält. Man bezeichnet die Erscheinung als „Labung“. Das Casein zerfällt dabei irreversibel in Paracasein und in Molkeneiweiß. Das Paracasein scheidet sich unlöslich aus, falls Kalksalze in der Flüssigkeit zur Verfügung stehen. Lange Zeit hat man die Labgerinnung für die Wirkung eines besonderen Fermentes, des sogenannten Labfermentes gehalten. Heute ist die weitaus wahrscheinlichste Annahme, die alle Beobachtungen erklärt, die, daß die Labgerinnung einfach der erste Schritt der Caseinspaltung ist; das Paracasein ist das Acidalbumin oder die erstentstehende Albumose des Caseins, und die Gerinnung beruht darauf, daß dieser im Beginn der Spaltung gebildete Körper ein unlösliches Kalksalz besitzt. Alle proteolytischen Fermente haben daher auch „labende“ Wirkung. Bei stärkerer Fermentwirkung zerfällt das Paracasein weiter und der Käse löst sich. Die Bedeutung der Labgerinnung im Magen liegt darin, daß durch sie die Hauptnahrungsbestandteile der Milch gleich im ersten Beginn der Magenverdauung in einen festen Körper verwandelt werden, der lange im Magen liegen bleibt, und dort gründlicher verdaut wird, als es bei einer rasch ablaufenden Flüssigkeit der Fall wäre. Das Paracasein hat, abgesehen von der Unlöslichkeit seines Kalksalzes, keine charakteristischen Eigenschaften; der Phosphorgehalt ist derselbe wie der des Caseins.

Neben dem Casein sind in der Kuhmilch noch die zwei früher erwähnten Eiweißkörper vorhanden, das Laktalbumin und das Laktoglobulin, dagegen keine Albumosen, wohl aber noch andere N-haltige Stoffe. Man rechnet gewöhnlich, daß in der Kuhmilch $^1/_7$ des Eiweiß auf Casein kommt, $^1/_7$ auf Albumin und Globulin, und daß die Menge der Extraktivstoffe gering ist, $^1/_{16}$ des Stickstoffs, 22 bis 34 mg Stickstoff in 100 ccm.

Viel erörtert ist die Frage, ob das Frauencasein mit dem Kuhcasein identisch sei oder ob die zweifellos vorhandenen Unterschiede der beiden Milchsorten sich nur auf die verschiedenen Mengenverhältnisse der einzelnen Stoffe in der Milch bezögen. Die Spaltungsprodukte des Frauencaseins sind schon oben mitgeteilt; ihre Menge spricht mehr für Identität, ohne daß die Frage nach kleinen Differenzen, wie etwa zwischen den Eiweißen nahestehender Pflanzen, irgendwie entschieden wäre.

Ein deutlicher Unterschied zwischen Frauenmilch und Kuhmilch besteht in der Form der Gerinnung; das Kuhcasein gerinnt in derben Flocken oder als festes Gerinnsel, das Frauencasein in feinen gallertigen Flöckchen. Doch beruht das nur auf dem verschiedenen Phosphatgehalt und der verschiedenen Reaktion. Ferner ist das Casein aus der Frauenmilch durch Säure nicht so gut zu fällen wie aus Kuhmilch. Nach Engel muß zumal für Salzsäure ein bestimmtes Mengenverhältnis eingehalten werden, 2 bis 3 ccm $^1/_{10}$ n-Salzsäure, 5 bis 12 ccm $^1/_{10}$ n-Essig- oder Phosphorsäure für 10 ccm Milch. Bei mehr oder weniger Säure erhält man keinen sich absetzenden Niederschlag, und außerdem gelingt die Fällung sehr viel besser, wenn die Milch erst dialysiert oder eine Zeitlang auf 40° erwärmt wird, oder wenn sie vorher gefroren und wieder aufgetaut wird. Auch Lab gibt nur dann eine gut sich absetzende Fällung, wenn man die Milch vorher einige Zeit auf 40° hält.

Die Frauenmilch ist im ganzen erheblich ärmer an Eiweiß, die Zusammensetzung schwankt stark. Von dem Stickstoff ist $^1/_5$ kein Eiweiß, und von dem Eiweiß kommen nur gegen 60% auf das Casein.

Die Eselinnenmilch steht in ihrer Zusammensetzung und ihren Eigenschaften, auch dem Verhalten zu Lab, der Frauenmilch nahe, $^2/_3$ bis $^3/_4$ des Eiweißes sind Casein, 10 bis 15% des Stickstoffs kein Eiweiß, die Milch enthält 0,94% Casein.

2. Vitellin. Im Eidotter der Hühnereier befindet sich ein phosphorhaltiger Eiweißkörper, der als Vitellin bezeichnet wird. Es enthält 12% N, 1,3% P. Es liefert kein Glykokoll, sonst bieten die Spaltungs-

Digitized by Google

produkte keine Besonderheiten. Dagegen enthält das Vitellin wahrscheinlich Glucosamin, ist also ein Phosphoglycoproteid wie das Ichthulin. In seiner Löslichkeit erinnert Vitellin an die Globuline, da es auch in Kochsalzlösung löslich ist.

Eingehend ist die aus dem Vitellin hervorgehende Paranucleinsäure untersucht worden, die Bunge Hämatogen genannt hat. Da das Präparat Eisen zu enthalten schien, das erst nach der Veraschung nachweisbar war, nahm Bunge an, daß das Eisen im Eidotter organisch gebunden enthalten sei, wie im Hämoglobin, nicht als Ion, und hielt das „Hämatogen" für die Muttersubstanz des Blutfarbstoffs. Es wird indessen bei den Nucleoproteiden (Plasminsäure) gezeigt werden, daß die Anschauung von der organischen Bindung des Eisens in den Phosphoreiweißen unrichtig ist.

Dagegen ist das Vitellin sicher ein wichtiges phosphorhaltiges Reservematerial. In unbebrüteten Eiern sind 64,8% des Phosphors im Lecithin, 27,1% im Vitellin enthalten. Im Laufe der Entwickelung, besonders in den späteren Bebrütungsstadien, nehmen beide stark ab, das Vitellin verschwindet schließlich ganz, und der Phosphor wird zu Nucleinsäure und zu dem phosphorsauren Kalk des Skeletts.

Auch die Froscheier enthalten reichlich Vitellin, das im Laufe der Entwickelung abnimmt.

3. Ichthulin. Ganz ähnliche Körper wie das Vitellin des Hühnereies sind in den Eiern der Fische enthalten; sie sind lange bekannt und erregten die Aufmerksamkeit dadurch, daß sie in kristallinischer Form, als sogenannte Dotterplättchen vorkommen. Auch hier ist der Körper wahrscheinlich mit Lecithin vereinigt. Untersucht sind die Ichthuline aus den Eiern des Karpfens des Kabeljaus, des Flußbarschs und des Störs. Neben dem P (0,6%) ist ein Glucosamin vorhanden.

Das Karpfenichthulin löst sich klar nur in Alkalien, in Salzlösungen dagegen zu einer opaleszierenden Flüssigkeit, aus der es durch Verdünnen oder Durchleiten von Kohlensäure gefällt wird. Das Barschichthulin ist anfangs in Salzlösungen löslich, verliert die Löslichkeit aber nach der Säurefällung. Zu Salzen verhält es sich wie die tierischen Globuline.

Die Paranucleinsäure aus dem Kabeljau hat einen Phosphorgehalt von 10,34%. 10 bis 15% des Ichthulins werden durch Pepsinsalzsäure gefällt. In der Zwischenflüssigkeit der Barscheier ist das bei den Globulinen genannte Percaglobulin enthalten, in den Eiern selbst findet sich kaum ein anderes Eiweiß neben dem Ichthulin.

Ein weiteres Phosphoglykoproteid ist bei den Glykoproteiden aufgeführt.

In Seeigeleiern (Arbacia pustulosa) findet sich kein Phosphor, der sich wie Vitellinphosphor verhielte.

4. Mucinähnliche Phosphoproteide. Sie haben die Eigentümlichkiet, sich physikalisch genau wie die eigentlichen Schleimsubstanzen, die Mucine und Mucoide, zu verhalten, d. h. die neutralen Ammoniak- oder Alkalisalze bilden zähe, fadenziehende Flüssigkeiten; durch Säuren werden sie gefällt, bei der Denaturierung, z. B. durch zu starke oder zu langdauernde Alkaliwirkung, langes Kochen oder lange fortgesetzte Alkoholbehandlung verlieren sie diesen Schleimcharakter, koaguliert werden sie nicht. Sie vertreten beim Rind, vielleicht auch bei anderen Tieren die Stelle der Mucine; die Schleimsubstanz der Niere, Gallenblase und Gelenksynovia der Rinder ist also ein Phosphoproteid.

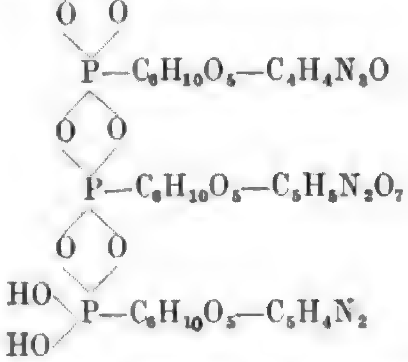
Diese Körper haben alle einen ziemlich hohen Schwefelgehalt; sonst verschiedene Zusammensetzung. Sie enthalten kein Kohlehydrat; sie geben mit Pepsinsalzsäure ein Pseudonuclein.

Aus manchen zellreichen Organe sind ebenfalls saure phosphorhaltige Eiweißkörper dargestellt wurden, und es ist angenommen worden, daß Phosphoproteide zur regelmäßigen Zusammensetzung des Protoplasmas gehörten. Es ist in der Regel aber kaum möglich, festzustellen, ob es sich nicht um Nucleoproteide, oder deren Gemenge mit Globulinen gehandelt hat.

II. Die Nucleoproteide.

Sie bestehen aus Eiweiß und Nucleinsäure.

a) Bau der Nucleinsäuren. Die echten Nucleinsäuren haben folgenden Bau:



Sie bestehen aus einer kondensierten Phosphorsäure, die mit 4 Molekülen von Glucosiden Ester bildet. Die Glucoside bestehen aus je 1 Molekül einer bisher noch

Digitized by Google

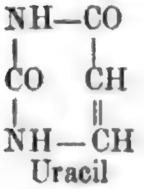
unbekannten Hexose und je 1 Molekül der 4 Basen Guanin, Adenin, Thymin und Cytosin. Ihre Formel ist $C_{43}H_{61}N_{15}P_4O_{34}$, ihr Molekulargewicht ist 1455. Sie ist eine 4 basische Säure.

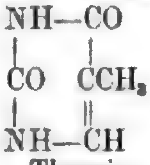
Behandelt man die Nucleinsäure in der Kälte mit starker Salpetersäure, so werden zunächst Guanin und Adenin vollständig abgespalten, und ihre schwer löslichen Nitrate kristallisieren aus. Diese Kristallisation gelingt so leicht, selbst mit den kleinsten Mengen nucleinsaurer Salze, z. B. unter dem Mikroskop, daß man sie als charakteristische Reaktion gebrauchen kann. Das Kohlenhydrat wird zu einer Säure $C_6H_{10}O_8$ oxydiert, die mit den bekannteren Säuren, Zucker- oder Schleimsäure, nicht identisch zu sein scheint.

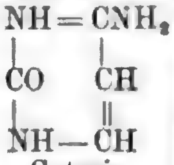
Bei der Spaltung durch starke, siedende Säuren (meist ist Schwefelsäure verwendet worden), wird das Nucleinsäure-Molekül ganz zerlegt, aber die Spaltung bleibt hierbei nicht stehen, vielmehr werden durch die Säuren die beiden Aminopurine Adenin und Guanin teilweise in die entsprechenden Oxypurine Hypoxanthin und Xanthin umgewandelt. Das Cytosin wird teilweise in Uracil überführt: da diese Prozesse Desamidierungen sind, findet sich dann daneben Ammoniak. Aus dem Kohlenhydrat aber entstehen neben huminartigen Substanzen Lävulinsäure und Ameisensäure.

Infolge der sekundären Desamidierung findet man also bei der Spaltung der Nucleinsäure selbst oder bei der Hydrolyse von Nucleoproteiden oder ganzen Organen sieben stickstoffhaltige Bestandteile der Nucleinsäure, 3 Pyrimidine und 4 Purine. Die 3 Pyrimidine sind:

1. Uracil oder 2,6-Dioxypyrimidin.
2. Thymin oder 5-Methyl-2,6-dioxypyrimidin.
3. Cytosin oder 6-Amino-2-oxypyrimidin.

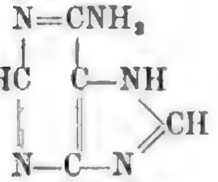

Uracil

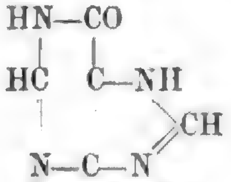

Thymin

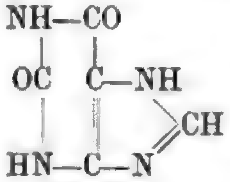

Cytosin

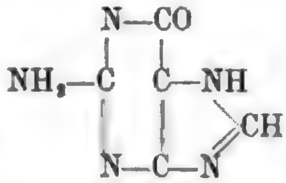
Die 4 Purinbasen sind:

$C_5H_5N_5$, das Adenin oder 6-Aminopurin,
$C_5H_5N_5O$, das Guanin oder 2-Amino-6-oxypurin,
$C_5H_4N_4O$, das Hypoxanthin oder Sarkin oder 6-Oxypurin,
$C_5H_4N_4O_2$, das Xanthin oder 2,6-Dioxypurin.


Adenin.


Hypoxanthin.


Xanthin.


Guanin.

Diese Purinderivate werden auch Nucleinbasen genannt; auch heißen sie Alloxurbasen oder Xanthinbasen.

Durch Kochen der Hefe-Nucleinsäure unter Druck bei neutraler Reaktion werden aus ihr die beiden Purinbasen zusammen mit der Hexose, also die Glucoside, abgespalten. Sie heißen Guanosin und Adenosin. Aus der Thymusnucleinsäure läßt sich kein Guanosin erhalten, aus dieser werden durch verdünnte Salpetersäure Guanin und Adenin abgespalten, während der Rest des Moleküls, die beiden Pyrimidine, die Phosphorsäure und die Hexose noch zusammenhängen. Dieser Rest wird als Thyminsäure bezeichnet.

Neben diesen echten Nucleinsäuren, wie sie bisher aus der Thymus, dem Heringsund Lachssperma und der Hefe dargestellt sind, gibt es eine zweite Gruppe, von der bisher 2 Vertreter bekannt sind, die Guanylsäure aus dem Pankreas und die Inosinsäure aus den Muskeln. Sie bestehen aus Phosphorsäure, einer Purinbase und einer Pentose, der d-Ribose, und enthalten von jedem dieser Bestandteile je ein Molekül. Bei der Hydrolyse zerfällt die Guanylsäure nach der Gleichung:

$$\underset{\text{Guanylsäure}}{C_{10}H_{14}N_5O_8P} + 2\,H_2O = \underset{\text{Guanin}}{C_5H_5N_5O} + \underset{\text{Pentose}}{C_5H_{10}O_5} + \underset{\text{Phosphorsäure}}{H_3PO_4}$$

Die Inosinsäure zerfällt nach der Gleichung:

$$\underset{\text{Inosinsäure}}{C_{10}H_{13}N_4O_8P} + 2H_2O = \underset{\text{Hypoxanthin}}{C_5H_4N_4O} + \underset{\text{Pentose}}{C_5H_{10}O_5} + \underset{\text{Phosphorsäure}}{H_3PO_4}$$

Durch Spaltung mit verdünnter Schwefelsäure erhält man aus der Inosinsäure das Glucosid Inosin, das sich aus Hypoxanthin und der Pentose zusammensetzt, also Inosinsäure minus Phosphorsäure ist.

b) Darstellung und Eigenschaften der Nucleinsäuren. Die Darstellung der Nucleinsäuren erfolgt am besten nach dem Verfahren von Neumann

Die Organe werden zunächst mit ganz verdünnter Essigsäure gekocht, der Rückstand durch Kochen in verdünnter Natronlauge (33:2000 für 1000 g Organ), der noch Natriumacetat (200 g) zugesetzt ist, in

Digitized by Google

Lösung gebracht und ½ Stunde erhitzt. Dann fällt man das Natriumsalz der Nucleinsäure durch Zusatz des gleichen Volumens Alkohol, und wiederholt dies mehrmals. Die freie Säure erhält man schließlich durch Fällen mit Salzsäure.

Eine andere Methode stammt von Schmiedeberg: er behandelt die Organe mit Kupferchlorid, wobei das nucleinsaure Eiweiß sich zu löslichem, salzsaurem Eiweiß und unlöslichem, nucleinsaurem Kupfer umsetzt, und entfernt so den größeren Teil des Eiweiß. Dann wird das nucleinsaure Kupfer durch Kaliumacetat zur Quellung gebracht, nochmals gewaschen, und schließlich mit Kalilauge und Alkohol behandelt. Darin lösen sich die Reste des Eiweiß, während das nucleinsaure Kupfer zurückbleibt. Doch scheint die so aus den Geweben isolierte Nucleinsäure auch schon nicht mehr die ursprüngliche zu sein, sondern sich von dieser durch die Löslichkeit der Säure und des Kupfersalzes in Kaliumacetat zu unterscheiden.

Die Nucleinsäuren sind im trockenen Zustande weiße, nicht hygroskopische Pulver. Sie sind nur amorph bekannt. Sie sind in kaltem Wasser wenig, in heißem viel leichter löslich, sehr leicht löslich in Alkalien, auch in Kaliumacetat. Durch Mineralsäuren werden sie gefällt und im Ueberschusse gelöst. Durch Alkohol werden sie bei Zusatz von gleichen Teilen gefällt, am besten durch salzsäurehaltigen 50prozentigen Alkohol oder unter Zusatz von Aether oder Natriumacetat. Mit den meisten Schwermetallen geben die Nucleinsäuren unlösliche Salze, werden daher von Kupfer-, Silber-, Zink-, Blei-, Eisensalzen gefällt. Ferner werden sie durch Gerbsäure, Pikrinsäure und Phosphorwolframsäure gefällt, sind also wie alle Purinderivate auch Basen. Die Farbenreaktionen des Eiweiß geben sie natürlich nicht, auch sonst keine charakteristischen Farbenreaktionen, wohl aber tun dies ihre Derivate, besonders die Purine.

Die Salze der Nucleinsäure, besonders aus den Leukocyten der Thymus, besitzen die bemerkenswerte physikalische Eigenschaft, Gallerten oder schleimartige Lösungen zu bilden. Eine 5 prozentige Lösung von nucleinsaurem Natron erstarrt beim Abkühlen auf etwa 42° zu einer glasklaren, festen, leimartigen Gallerte, und auch 2,5 prozentige Lösungen erstarren ebenso, wenn sie Kochsalz oder Fleischwasserpeptonbouillon enthalten. Man hat dies nucleinsaure Natron daher zur Herstellung von festen, bei 37° noch fest bleibenden, Nährböden für Bakterien benutzt.

Sind die Lösungen verdünnter, so erhält man keine feste Gallerte, aber die Lösungen haben, zumal in Gegenwart von Eiweiß, eine ausgesprochen zähflüssige, an Mucinlösungen erinnernde Konsistenz. Vogelblut erstarrt beim Zusatz von Natronlauge durch die Nucleinsäure der kernhaltigen Blutkörperchen gallertig, und auch menschliches Blut zeigt, zumal bei vermehrter Leukocytenzahl, noch Anzeichen davon, ebenso leukocytenreicher Harn.

Die Nucleinsäuren und ihre Derivate, die Nucleine und Nucleoproteide, sind rechtsdrehend. Die Eiweißkomponente ist linksdrehend, doch überwiegt die Drehung der Nucleinsäure.

Am wichtigsten sind die Salze der Nucleinsäure mit Eiweiß. Sie sind unlöslich, verhalten sich aber wie die Salze der Eiweißkörper mit den Alkaloidreagenzien, d. h. sie werden bei mangelndem Ueberschuß von Säure hydrolytisch dissoziiert. Die Nucleinsäure fällt daher Eiweiß nur bei saurer, nicht aber bei alkalischer oder neutraler Reaktion.

Eine Zeitlang hat man angenommen, die Nucleinsäure enthalte Eisen, und zwar in organischer Bindung d. h. nicht als Ion, und schrieb dem Eisen der Zellkerne, das in dieser Weise gebunden sein sollte, eine wichtige physiologische Rolle zu. Neuerdings hat sich aber ergeben, daß die Nucleinsäure, die Nucleoproteide und wahrscheinlich die Zellkerne und Zellen überhaupt eisenfrei sind. Die Nucleinsäure „maskiert" nämlich Eisen. Setzt man zu einer Lösung von Metaphosphorsäure so viel Eisenchlorid hinzu, wie durch die überschüssige Säure in Lösung gehalten werden kann, stumpft mit Ammoniak ab und fällt mit Alkohol und Aether, so erhält man einen in Wasser, Salzsäure und Ammoniak löslichen Körper, in dem das Eisen mit wenig Schwefelammonium gar nicht, durch mehr auch nicht sofort nachgewiesen werden kann, und aus dem es mit Salzsäurealkohol nur unter besonderen Bedingungen extrahierbar ist. Genau so verhält sich die Nucleinsäure, die ja eine Metaphosphorsäure ist. Auch sie verhindert das Eintreten der Eisenreaktionen, ohne daß irgendein Grund vorliegt, an eine „organische" Bindung des Eisens, d. h. eine Verbindung, in der das Eisen nicht Ion ist, zu denken. Auch die Paranucleinsäure aus den Phosphoproteiden und die Nucleoproteide maskieren in dieser Weise Eisen. Das in den Geweben etwa vorhandene Eisen wird bei der Extraktion und Darstellung der Nucleinsäuren und besonders der Nucleoproteide mit diesen zusammen gewonnen, die Reaktionen des Eisenions werden verhindert, und so kam die Lehre zustande, die Nucleinsäuren und Nucleoproteide enthielten Eisen in nicht ionisierter Form. Vgl. auch das sogenannte Hämatogen aus Vitellin, das die Vorstufe des Hämoglobins sein sollte.

c) Die Nucleinsäuren in den leben-

Digitized by Google

den Organismen. In derselben Weise wie durch siedende Säuren wird die Nucleinsäure durch Fermente zerlegt, die sogenannten Nucleasen. Sie sind im Pankreas- und wahrscheinlich im Darmsaft vorhanden, außerdem in der Thymus und vermutlich in anderen Organen und in Bakterien. Bei jeder Autolyse findet man Purinbasen und Pyrimidine. Doch ist es bisher nicht möglich gewesen, die Nuclease in gut wirksamem Zustande zu extrahieren, und auf Nucleinsäure einwirken zu lassen. Die Extrakte veränderten die Nucleinsäure, verloren aber vor der vollen Spaltung ihre Wirkung. Wie andere Fermente haftet die Nuclease bei der Extraktion der Organe an den Nucleoproteiden.

Ein weiteres Ferment wirkt ebenfalls wie siedende Säuren, es spaltet Adenin und Guanin in Hypoxanthin und Xanthin. Es ist in Leber, Milz, Niere, in Pflanzen, Bakterien gefunden und als Ergebnis seiner Wirkung findet man bei der Autolyse alle 4 Purinbasen und alle 3 Pyrimidine.

Im Stoffwechsel der Tiere wird die Phosphorsäure der Nucleinsäure als Phosphorsäure ausgeschieden, über das Schicksal der Pyrimidinderivate besteht noch keine Klarheit, bei den Purinderivaten bestehen zwischen den Tieren große Differenzen; beim Hund geht jedenfalls ein Teil in Allantoin über, ebenso beim Schwein, beim Menschen wird der Stickstoff der Nucleinsäure in der Hauptsache zu Harnstoff, daneben wird eine Beziehung der Purinbasen zum Harnsäurestoffwechsel angenommen, da die Harnsäure als 2-, 6-, 8-Trioxypurin dem Xanthin außerordentlich nahe steht, und durch fermentative Oxydation aus ihm entstehen kann. Doch ist diese Bildung der Harnsäure schwerlich die einzige. Bei den Vögeln wird sie synthetisch gebildet.

Ferner kommt unter den Extraktivstoffen des Fleisches freies Hypoxanthin vor, und außerdem das obengenannte Inosin. Ein Gemenge von Inosin und Hypoxanthin ist das Carnin des Fleischextraktes. In jungen Pflanzen, z. B. der Wicke, ist Guanosin gefunden, und unter dem Namen Vernin beschrieben. In anderen Pflanzen, und damit in der Nahrung der Tiere finden sich methylierte Xanthine, vor allem das Trimethylxanthin oder Kaffein, und die Dimethylxanthine Theobromin und Theophyllin.

d) Die Nucleoproteide. Die Nucleinsäure bildet mit Eiweiß die sogenannten Nucleoproteide. In den Spermatozoen einiger Fische ist die Nucleinsäure als Salz, nämlich als nucleinsaures Protamin oder nucleinsaures Histon enthalten. In den Organen der Säugetiere liegen andere, noch keineswegs aufgeklärte Verhältnisse vor. Ja, es ist gelegentlich die Existenz der Nucleoproteide als besonderer Verbindungen überhaupt bestritten worden, indem man so folgerte: Die Nucleinsäure fällt Eiweiß nur bei saurer Reaktion. Extrahiert man daher ein Organ mit einer neutralen oder alkalischen Flüssigkeit, so kann neben dem Eiweiß das darin enthaltenene nucleinsaure Natron in Lösung gehen; säuert man aber an, so fällt nucleinsaures Eiweiß aus. Wenn man daher beispielsweise aus einem Wasserextrakt der Thymus mit Essigsäure ein „Nucleoproteid" fällt, so kann dies ein Kunstprodukt sein, das in der Zelle nicht präformiert war, und es brauchen die nucleinsauren Eiweiße ebensowenig eine Sonderstellung einzunehmen, wie etwa die phosphorwolframsauren oder taurocholsauren Eiweißkörper. Der Einwand ist kaum richtig, und man darf daher die Nucleoproteide als chemische Individuen und eigene Eiweißkörper ansehen. Sicher ist freilich, daß die eiweißfällende Eigenschaft der Nucleinsäure, und auch mancher Verbindungen der Nucleinsäure mit Eiweiß, die Gewinnung und Untersuchung reiner Körper außerordentlich erschwert. Die Nucleoproteide sind daher noch schlechter gekannt als die einfachen Eiweißkörper des Zellinhaltes.

Die Nucleoproteide gehen immer dann und nur dann in Lösung, wenn der Zellkern zerfällt. Die Nucleoproteide sind also Bestandteile des Zellkerns und übertreffen damit in den zellreichen, drüsigen Organen alle anderen Eiweißkörper an Menge. Von den Leukocyten der Thymus sind 77% der Trockensubstanz Nucleohiston und die Köpfe (Kerne) der reifen Spermatozoen der Fische bestehen, wenn man von den ätherlöslichen Produkten absieht, fast ganz aus nucleinsaurem Protamin und enthalten andere Eiweißkörper nur in Spuren. Da die den Zellkern mikroskopisch charakterisierenden Gebilde basophil, d. h. Säuren sind, kann es keinem Zweifel unterliegen, daß das Chromatingerüst des Kernes in der Hauptsache aus den sauren Nucleinstoffen besteht. Ob dies freilich Nucleoproteide sind, oder ob das Chromatin Nucleinsäure ist, während die ungefärbte Zwischensubstanz Eiweiß enthält, das ist augenblicklich weder chemisch noch mikroskopisch zu entscheiden. Gründet sich der mikroskopische Nachweis doch überwiegend auf den Charakter des Chromatins als Säure, und Säuren sind die Nucleine und Nucleoproteide wie die Nucleinsäure. Zwischen der färberisch sichtbar zu machenden Menge des Kernchromatins und der chemisch nachweisbaren Menge des Nucleinphosphors besteht bei der Entwickelung der Seeigeleier gar keine Proportionalität. Histologisch nimmt die Menge des Chromatins während der Furchung ungeheuer zu, während der Nucleinphosphor nahezu unverändert bleibt.

Die Eiweißpaarlinge der Nucleinsäure der

Digitized by Google

Fischhoden sind Protamine und Histone, die bei den einfachen Eiweißkörpern besprochen sind. Auch in den Leukocyten der Thymus und den kernhaltigen roten Blutkörperchen ist die Nucleinsäure mit Histon vereinigt. In allen anderen Organen ist der Eiweißpaarling nicht isoliert. In den Spermatozoen und den Vogelblutkörperchen liegt ein Salz der Nucleinsäure mit Protamin und Histon vor, bei anderen Nucleoproteiden scheint dagegen eine andere Verbindung zwischen Nucleinsäure und Eiweiß möglich zu sein. Bei deren Spaltung wird nicht die Nucleinsäure von dem Eiweiß abgespalten, sondern eine Verbindung der Nucleinsäure mit einem weiteren Teile des Eiweiß, ein sogenanntes Nuclein. Es sieht danach so aus, als sei die Nucleinsäure mit zwei Teilen Eiweiß verbunden, von denen der eine leicht, der andere schwer abzutrennen ist.

Dazu ist indessen zu bemerken, daß die Nucleine noch viel schwerer rein zu erhalten sind als die Nucleoproteide, und daß man daher noch leichter Gemenge oder Kunstprodukte bekommen kann. Sie enthalten etwa 4% P.

Die Nucleoproteide sind in reinem Zustande, wie andere Eiweißkörper, lockere, weiße, nicht hygroskopische Pulver. Sie haben alle ausgesprochen sauren Charakter, sind in Wasser und Salzlösungen löslich, löslicher noch in Alkalien. Durch Säuren werden sie gefällt, im Ueberschusse, besonders der Mineralsäuren, wieder gelöst; doch können sie hierdurch zerlegt werden. Die Aussalzungsgrenzen sind bei den einzelnen verschieden, ebenso das Verhalten beim Erhitzen, doch koaguliert jedenfalls der größere Teil der Nucleoproteide mit dem Eiweiß der Organe (siehe unten beim Pankreas) und findet sich daher im Rückstand, wenn man die Organe mit Wasser auskocht. Löslichkeit in Salzen siehe unten bei der Thymus. Mit Pepsinsalzsäure geben Nucleoproteide einen Niederschlag, der Nucleinsäure mit etwas Eiweiß ist, also ein Nuclein. Zellkerne werden daher vom Magensaft nicht aufgelöst. Pankreassaft löst sie dagegen leicht, was zu einer klinischen Probe auf die Suffizienz des Pankreas verwertet wird.

Die Nucleoproteide haben die gleichen Löslichkeitsverhältnisse wie viele Fermente, und man erhält beide Klassen von Körpern daher häufig gemeinsam. So haften Pepsin, Trypsin, Fibrinferment, Enterokinase und manche Toxine an ihnen, ohne darum natürlich Nucleoproteide zu sein. Auch sonst sei betont, daß das besonders reichliche Vorkommen der Nucleoproteide an sich noch kein Beweis für eine besonders wichtige biologische Funktion ist. Sie können ebensogut die Gerüst- und Schutzsubstanzen des eigentlich Lebendigen sein.

e) Die einzelnen Nucleoproteide und Nucleinsäuren. 1. Nucleoproteide aus den Spermatozoenköpfen. Wenn man reife Lachs- oder Heringshoden mit Wasser, Alkohol und Aether extrahiert, so gehen die übrigen Bestandteile der Spermatozoen in Lösung und es bleiben die Spermatozoenköpfe als blendendweiße, aus kleinen gleichmäßigen Kügelchen bestehende Masse zurück, die zum weitaus größten Teile aus nucleinsaurem Protamin besteht. 65,4% sind Nucleinsäure, 22,3% Protamin. Kaum mehr als 10% fehlen noch, ein bei der großen biologischen Bedeutung der Spermakörper sehr bemerkenswertes Resultat. Nucleinsäuren sind auch im Sperma anderer Fische und in Säugetiersperma gefunden.

2. Thymus. Nucleohiston. Wenn man Kalbsthymus mit physiologischer Kochsalzlösung behandelt, so erhält man eine große Menge von Leukocyten, die man mit Wasser in Lösung bringen kann. Durch Fällen des Wasserextraktes mit Essigsäure erhält man das Nucleohiston, das 77% der Trockensubstanz der Leukocyten ausmacht. Es ist löslich in Wasser, Alkalien und kohlensauren Alkalien, durch verdünnte Essigsäure wird es gefällt. Durch Behandeln mit Salzsäure von 0,8% zerfällt es in Histon, das früher bereits beschrieben wurde, und ein Nuclein, das Leukonuclein. Dies Nuclein enthält 4,702% Phosphor. Durch Kochen und durch Pepsin und Salzsäure resultiert ebenfalls ein Nuclein, das letztere mit 4,99% Phosphor. Die Thymusnucleinsäure ist die genauest bekannte. Wahrscheinlich gibt es mehrere Nucleohistone, die sich durch ihre Fällungsgrenzen, auch ihren Phosphorgehalt unterscheiden. Eines von diesen ist in einer NaCl-Lösung von 0,9% unlöslich, in verdünnterer und konzentrierterer Lösung wird es dagegen gelöst. Auf der Existenz dieses Nucleohistons beruht es demnach, daß sich die Leukocyten nicht in 0,9 prozentiger NaCl-Lösung, wohl aber in reinem Wasser und stärkeren Salzlösungen lösen. Diese Tatsache ist deswegen von besonderem Interesse, weil man sonst die Auflösung der Leukocyten in Wasser auf physikalische Eigenschaften der Zellen zurückführt, während sie hier als chemisch begründet erscheint.

Nucleinsäuren sind auch aus anderen, an Leukocyten reichen Organen gewonnen, so aus der Milz, aus Lymphdrüsen, aus Eiter usw.

Nucleoproteide sind ferner isoliert aus dem Magensaft, der Magenschleimhaut, der Schilddrüse, den Nebennieren, der Leber, der Darmschleimhaut und der Milchdrüse, dem Hepatopankreas der Oktopoden und Schnecken. Purinbasen, also charakteristische Spaltungsprodukte der Nucleinsäure,

Digitized by Google

sind noch aus vielen anderen Organen gewonnen.

3. **Nucleoproteid aus den Kernen der roten Blutkörperchen des Vogel- und Reptilienblutes.** Es enthält

N 17,20% P 3,93%

und liefert

Nucleinsäure	42,1 %
Histon	57,82 %

4. **Die Nucleoproteide des Pankreas.** Das Pankreas enthält 2 Nucleoproteide. Extrahiert man Pankreasdrüsen mit eiskalter Kochsalzlösung, so geht ein Nucleoproteid in Lösung, das durch Essigsäure fällbar ist, 1,67% P enthält, und beim Kochen ein Nuclein mit 4 bis 5% P liefert, das in sehr verdünnter Essigsäure löslich ist. Aus diesem Proteid läßt sich die Guanylsäure gewinnen, die man daher auch in Lösung bekommt, wenn man Pankreasdrüsen bei schwach saurer Reaktion auskocht. Im Rückstand von der Kochsalzextraktion oder von dem Auskochen befindet sich ein zweites Proteid, aus dem sich eine Nucleinsäure gewinnen läßt, die der Thymusnucleinsäure analog konstituiert ist.

5. **Nucleoproteide aus Hefe, Bakterien, Pflanzen.** Die Hefenucleinsäure, die eine der bestgekannten ist, gehört zu der Gruppe der Thymusnucleinsäuren. In der Hefe kommt außerdem die Plasminsäure vor, eine Metaphosphorsäure, die wie die Nucleinsäure Eisen maskiert. Bei Schimmelpilzen kommen 40% des N auf Nuclein-N.

Im Weizen kommt die Triticonucleinsäure vor, eine echte Nucleinsäure. Aus vielen anderen Pflanzen sind Nucleinsäuren oder ihre Spaltungsprodukte isoliert.

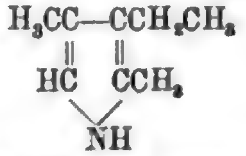
Auch bei den Pflanzen sind die zellreichen Teile besonderes reich an Nucleinsäure; so sieht man bei Verwundungen von Pflanzen und der dadurch bedingten Gewebsneubildung eine Vermehrung der Nucleoproteide.

III. Hämoglobin und Verwandte.

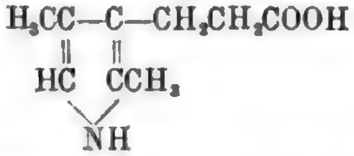
Das Hämoglobin, der rote Blutfarbstoff der Wirbeltiere, bildet den Hauptbestandteil der roten Blutkörperchen. Es besteht als Proteid aus einem Eiweißkörper, dem Globin, und einem nichteiweißartigen Bestandteile, dem Hämatin (vgl. zu dem ganzen Abschnitt den Artikel „Blut").

Das Hämatin und seine Derivate. Das Hämatin, der nichteiweißartige Paarling des Hämoglobins, ist ein eisenhaltiges Pyrrolderivat, dessen Konstitution zwar noch nicht in allen Einzelheiten aufgeklärt, aber in den Hauptzügen bekannt ist.

Danach kann man aus dem Hämatin oder einem seiner Derivate durch Reduktion als charakteristischen Baustein Hämopyrrol gewinnen, $C_8H_{13}N$, das Dimethyläthylpyrrol oder ein Gemenge von diesem mit einem Pyrrolin und mit Methyläthylpyrrol ist:



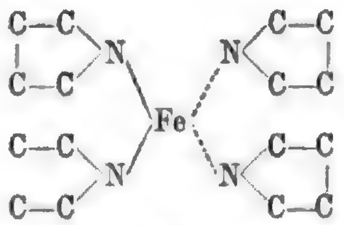
Neben dem Hämopyrrol entsteht die Hämopyrrolcarbonsäure $C_9H_{13}NO_2$, von der Formel:



Das Hämatin enthält also 2 verschiedene Pyrrolderivate, und 2 von jedem dieser, es sind also 4 Pyrrolkerne zum Hämatin vereinigt. Wie sich die Pyrrolkerne aber nun miteinander verketten, und wie sich vor allem ihre Seitenketten miteinander vielleicht zu neuen Ringbildungen verschlingen, das ist durchaus nicht klar. In jedem Falle aber hat man ein Gemenge von nahe verwandten Isomeren und Homologen vor sich. Infolge der Anwesenheit der Hämopyrrolcarbonsäuren enthält das Hämatinmolekül 2 Carboxylgruppen, die aber anscheinend nicht oder nicht in allen Derivaten frei sind, sondern Ester oder Anhydride bilden. Mit der Bindung des Eisens haben sie aber nichts zu tun.

Zwei dieser Pyrrole vereinigt, stellen das Hämatoporphyrin dar, $C_{16}H_{18}N_2O_3$, das bereits ein charakteristisches Spektrum hat, und zwei Moleküle Hämatoporphyrin werden durch den Eintritt eines Eisenatoms zu dem Hämochromogen miteinander vereinigt, dem wahrscheinlich die Formel $C_{34}H_{34}N_4FeO_4$ oder eine ähnliche zukommt.

Das Eisen ist nicht etwa als Ion vorhanden, sondern es ersetzt die Imidwasserstoffe der Stickstoffatome. Es ergibt sich folgendes Bild, wobei das Eisen zweiwertig gedacht, aber in komplexer Form auch noch mit 2 weiteren Stickstoffatomen verbunden ist:



Außer durch das Eisen sind die Pyrrole noch durch ihre Seitenketten verknüpft.

Durch den Eintritt des Eisens gewinnt das Molekül nun die Fähigkeit, mit Sauerstoff zu reagieren. In dem Hämochromogen ist das Eisen zweiwertiges Ferroeisen und dies

Digitized by Google

kann nun entweder in lockerer Weise Sauerstoff anlagern, etwa in der Form eines Peroxyds, oder es kann zu dreiwertigem Ferrieisen oxydiert werden, und der so gebildete Stoff ist das Hämatin α, das zwar durch Reduktionsmittel der verschiedensten Art wieder zu der Ferroverbindung Hämochromogen reduziert werden kann, im Vakuum seinen Sauerstoff aber nicht abgibt. Von diesem α-Hämatin leiten sich zwei weitere Ferriverbindungen ab, das sogenannte β-Hämatin, das wahrscheinlich ein Polymerisationsprodukt des α-Hämatins und darum weniger reaktionsfähig ist, und das Hämin. Dem Hämin kommt die Formel zu $C_{34}H_{32}N_4FeClO_4$, wo an Stelle des Eisens der Chloroferrikomplex steht.

Hämin. Wegen seiner leichten Kristallisierbarkeit wird es oft als Ausgangspunkt der Hämatinuntersuchungen benutzt. Auch zum Blutnachweis dient es (Teichmannsche Kristalle).

Das Hämin sowohl wie die übrigen hier zu nennenden Körper, insbesondere auch das Hämoglobin und seine Verbindungen mit Gasen, haben äußerst charakteristische Spektra, die oft untersucht und zur Erkennung der Körper benutzt worden sind. Das Hämin bildet Streifen, 1. im Rot, 2. im Rot-Orange und an der Grenze des Violetts. An den beiden letzteren Orten haben die meisten der Hämoglobinderivate die wichtigsten Streifen.

Hämatin. Aus dem Hämin erhält man durch Verseifung mit Natronlauge, die schon in der Kälte sehr leicht ist, und Fällen mit Salzsäure das Hämatin. Es ist ein amorphes, blauschwarzes Pulver, das sich in Wasser, Alkohol, Aether nicht, in Eisessig und Säuren sehr wenig löst, leicht dagegen in Alkalien und in säurehaltigem Alkohol oder Aether. In alkalischen Lösungen ist es rot, in dünner Schicht grünlich, in saurer braun. Das Spektrum des sauren Hämatins hat eine große Aehnlichkeit mit dem des sauren Methämoglobins; es hat 2 Streifen im Grün zwischen D und E, sehr ähnlich denen des Oxyhämoglobins und einen breiten Streifen zwischen b und F, endlich einen Streifen im Rot. Im Violett zeigt es ein breites, intensives Band.

Das Hämatin hat in verdünnter Lösung einen gelben Farbenton, der leicht durch Farben nachzuahmen ist. Deshalb, und da es im Unterschied von dem Hämoglobin haltbar ist, wird es bei einigen Apparaten zur Hämoglobinbestimmung im Blut benutzt, indem das Blut stark verdünnt, das Oxyhämoglobin mittels Salzsäure in Hämatin verwandelt und dessen Farbe mit der einer bekannten Lösung verglichen wird (Sahli, Königsberger und Autenrieth).

Hämochromogen. Aus dem Hämatin entsteht durch Reduktion das Hämochromogen, das auch direkt durch Zersetzung des reduzierten Hämoglobins unter Sauerstoffabschluß erhalten werden kann. Es bildet ein Pulver, das wie roter Phosphor aussieht, beim stärkeren Trocknen braunrot wird und in feuchtem Zustande sorgfältig vor Luft geschützt werden muß, da es sonst in Hämatin übergeht. Es ist in Wasser, Alkohol und Aether unlöslich, in Alkalien leicht löslich mit schön kirschroter Farbe; durch Neutralisation wird es gefällt. Wenn man Blut mit Alkalien behandelt, besonders in der Hitze, erhält man eine Flüssigkeit von der Farbe des Hämochromogens, doch sind die Verhältnisse noch nicht aufgeklärt. Hämochromogen bildet mit Pyridin sehr leicht charakteristische Kristalle, die wie die Teichmannschen Kristalle zum Nachweis von Blut in Betracht kommen.

Wenn man eine alkalische Hämochromogenlösung mit Luft schüttelt, so geht sie in Hämatin über: durch erneute Reduktion entsteht wieder Hämochromogen. Ferner gibt das Hämochromogen, nicht aber das Hämatin, analog dem Hämoglobin ein Kohlenoxydhämochromogen mit dem Spektrum des Kohlenoxydhämoglobins, ebenso ein Stickoxydhämochromogen, dessen Spektrum ebenfalls dem des Stickoxydhämoglobins entspricht, und das nicht reduziert werden kann. Beide entstehen dadurch, daß Kohlenoxyd und Stickoxyd an derselben Stelle angreifen, an der das Sauerstoffmolekül angelagert wird, wenn das Hämochromogen zu Hämatin oder richtiger zu dem nicht mit Sicherheit isolierten peroxydartigen Körper oxydiert wird. Infolgedessen kann das Hämochromogen nur mit einem der 3 Gase Sauerstoff, Kohlenoxyd und Stickoxydul reagieren, d. h. die Gase verdrängen einander. Betrachtet man nun die 3 Moleküle:

O_2	CO	NO
Sauerstoff,	Kohlenoxyd,	Stickoxyd,

so sieht man, daß der Sauerstoff keine freie Valenz im Sinne der strengen älteren Valenzlehre besitzt, wohl aber das Stickoxyd, und daß das Kohlenoxyd zwischen beiden steht. Infolgedessen ist Sauerstoff am lockersten gebunden, dann folgt Kohlenoxyd, und am festesten haftet Stickoxyd. Ueber die Einzelheiten der Verbindungen mit diesen Gasen siehe unten beim Hämoglobin. Für die Auffassung der Bindung ist es von entscheidender Wichtigkeit, daß im Kohlenoxydhämochromogen (dies ist leichter zu untersuchen, als die entsprechende Verbindung mit Sauerstoff) auf ein Atom Eisen genau ein Molekül Sauerstoff kommt.

Das Hämochromogen zeigt einen Streifen zwischen D und E, näher zu D, sowie einen zweiten, der vor E beginnt und bis über B

Digitized by Google

herausgeht. Es hat eine hohe Lichtextinktion, besonders der erste Streifen ist sehr intensiv. Im Violett hat es einen ebenfalls sehr intensiven Streifen zwischen H und G.

Durch stärkere Einwirkungen, besonders von Säuren, wird das Eisen aus dem Hämatinmolekül entfernt. Hämatin und Hämochromogen werden zu Hämatoporphyrin.

Hämatoporphyrin. Läßt man Bromwasserstoff auf Hämin wirken, so resultiert die Gleichung:

$$C_{32}H_{32}N_4FeO_4 + 2\ H_2O + 2\ HBr = 2\ C_{16}H_{18}N_2O_3 + FeBr_2 + H_2.$$

Das Hämatoporphyrin ist durch die Carboxylgruppe der Hämopyrrolcarbonsäure, die im Gegensatz zu den Verhältnissen beim Hämatin hier frei ist, eine Säure, die ein- und zweibasische Metallsalze besitzt. Da aber durch die Entfernung des Eisens auch die Imidwasserstoffatome der Pyrrole frei sind, bildet es auch mit Salzsäure ein in braunroten Nadeln kristallisierendes Salz. Das Hämatoporphyrin ist bei Sulfonalvergiftung, gelegentlich auch bei anderen Krankheiten oder bei Gesunden im Harn gefunden worden, aus dem es durch Baryt- oder Kalkhydrat, nach Nebelthau am einfachsten durch Essigsäure, gefällt wird. Der Harn hat dann eine burgunderrote Färbung. Häufig scheint es sich erst beim Stehen an der Luft aus einem ungefärbten Chromogen zu bilden.

Durch vorsichtige Reduktion des Hämatoporphyrins oder des Hämins entsteht das Mesoporphyrin von der Zusammensetzung:

$$C_{16}H_{18}N_2O_2,$$

das also ein Sauerstoffatom weniger enthält als das Hämatoporphyrin. Es steht dem Hämatoporphyrin spektroskopisch und chemisch sehr nahe (siehe unten).

Durch energischere Reduktion entstehen Hämopyrrol und seine Derivate, durch Oxydation die sogenannten Hämatinsäuren.

Beziehungen des Hämatins zu anderen natürlich vorkommenden Farbstoffen. Es wurde schon erwähnt, daß die Seitenketten der das Hämatin zusammensetzenden Pyrrolkerne sich anscheinend zu weiteren Ringen zusammenschließen. Vielleicht findet sich unter diesen ein Indolring, so daß auf diese Weise das Eiweißspaltungsprodukt Tryptophan, das auch den Indolring enthält, in Beziehungen zu dem Hämatin treten könnte.

Derivate des Hämatoporphyrins kommen im Tierkörper vor. 1847 entdeckte Virchow in Blutextravasaten das Hämatoidin, das dort in schön ausgebildeten Kristallen, schiefen rhombischen Säulen von hell ziegel- bis tief rubinroter Farbe vorkommt. Dieses ist mit dem Mesoporphyrin identisch, das auch die Farbenänderungen des Hämatoidins zeigt.

Aber auch der Gallenfarbstoff ist ein Abkömmling des Hämatoporphyrins, ist dem Mesoporphyrin ähnlich und liefert die gleichen Oxydationsprodukte. Aus dem Bilirubin der Galle, aus dem Hämatin und Hämatoporphyrin erhält man durch Reduktion das Hydrobilirubin, das mit dem Urobilin, einem Farbstoff des Harnes und Kotes identisch ist.

Vielleicht noch interessanter sind die Beziehungen zwischen Blut- und Blattfarbstoff. Aus dem Chlorophyll, dem grünen Farbstoff der Pflanzen erhält man durch Behandlung mit Alkalien eine Reihe von Substanzen, die Phylline, die durchaus den charakteristischen Aufbau des Hämatinmoleküls besitzen, 4 Pyrrolderivate, von denen 2 Säuren sind, und die alle 4 durch ein komplex gebundenes Metall miteinander zusammenhängen. Die Stelle Fe ist beim Chlorophyll durch Mg eingenommen. Durch Säurewirkung läßt sich aus den Phyllinen wie aus dem Hämatin das Metall entfernen, und es entstehen die Phylloporphyrine, die sich zwar noch nicht in Hämatoporphyrin verwandeln lassen, aber doch in Mesoporphyrin, das von der Mittelstellung zwischen Hämato- und Phylloporphyrin seinen Namen hat.

Das Globin. Das Globin ist der, oder jedenfalls der hauptsächlichste, Eiweißbestandteil des Hämoglobins. Das Globin hat mit den Histonen die Eigenschaft gemein, durch Alkalien gefällt zu werden. Nur wird es durch eine viel geringere Menge Ammoniak und Alkali gefällt, aber schon durch einen sehr geringen Ueberschuß wieder gelöst, bei stärkerem Ueberschusse sogar bei Gegenwart eines Ammoniaksalzes. Ueber Spaltungsprodukte vgl. die Tabelle in Abschnitt 4. Bemerkenswert ist der sehr hohe Gehalt an Histidin, und der sehr niedere S-Gehalt, sowie das Fehlen des Glykokolls. Es ist eines der weitest aufgelösten Eiweiße.

Wenn man eine reine, salzfreie Hämoglobinlösung mit wenigen Tropfen sehr verdünnter Säure behandelt, so wird das Hämoglobin in Globin und Hämatin gespalten. Doch scheint kein Salz vorzuliegen, sondern eher ein Ester oder ähnliches. Versetzt man eine Hämoglobinlösung mit wenig Säure und dann mit Alkohol und Aether, so geht das Hämatin in den Aether, während das Globin in dem wässerig-alkoholischen Anteil bleibt. Behandelt man Hämoglobin mit Pepsin-Salzsäure, so scheidet sich das Hämatin unlöslich ab, während das Globin peptonisiert wird. — 100 Teile Hämoglobin liefern 94 Teile Globin, 4,47 Teile Hämatin, daneben niedere Säuren der Fettreihe.

Hämoglobin. Es kristallisiert in wohlausgebildeten Kristallen und ist damit einer der bestgekannten Eiweißkörper. Zusammensetzung (Pferdeblut) C 54,4 %, H 7,2 %,

Digitized by Google

N 17,61%, S 0,65%, Fe 0,47%, O 19,67%. Molekulargewicht vgl. Abschnitt 11. Verbrennungswärme 5885 cal., Aussalzungsgrenzen für Ammonsulfat 6,5 und 10. Im Gegensatz zu den einfachen Eiweißen, aber in Uebereinstimmung mit dem Casein wird Hämoglobin durch Schütteln mit Chloroform gefällt, geht dagegen wie die Albumine durch Porzellan und Kieselguhr durch. Bemerkenswert ist die große Resistenz des Hämoglobins gegen die Fäulnis, die zwar das Oxyhämoglobin in reduziertes Hämoglobin umwandelt, dies aber nicht weiter angreift. Auch gegen Trypsin ist Hämoglobin sehr resistent, besonders solange es sich in den lebenden roten Blutkörperchen befindet. Zur Bestimmung des Hämoglobins im Blute sind eine Reihe von kolorimetrischen Methoden angegeben worden, die eine exakte Bestimmung in 1 Tropfen (20 cmm) gestatten. Bei der Methode von Haldane wird das Hämoglobin in Kohlenoxydhämoglobin verwandelt, bei den von Sahli und Autenrieth und Königsberger in Hämatin (siehe oben S. 153).

Im Gegensatz zum Globin und den einfachen Eiweißkörpern ist das Hämoglobin rechtsdrehend. Ferner sind Hämoglobin und seine verschiedenen Verbindungen mit Gasen im elektrischen Felde diamagnetisch, das Hämatin dagegen stark paramagnetisch. Hämoglobin wird durch Licht in starker Weise beeinflußt. Es erwiesen sich alle Lichtstrahlen als wirksam, aber die kurzwelligen, von einer Wellenlänge von 310 $\mu\mu$, sind wie bei allen photochemischen Prozessen besonders wirksam. Im Vakuum werden Methämoglobin und Oxyhämoglobin durch Licht in reduziertes Hämoglobin umgewandelt, bei Gegenwart von Sauerstoff aber wird Hämoglobin durch Licht gespalten und es entsteht Hämatin.

Die roten Blutkörperchen der Säugetiere bestehen zum größten Teile aus Hämoglobin; von ihrer Trockensubstanz kommen beim Menschen 94,3, beim Hunde 86,5, beim Igel 92,25% auf Hämoglobin; bei der Gans dagegen nur 62,65 und bei der Ringelnatter 46,70%. Der Rest besteht aus der Gerüstsubstanz, bei den Nichtsäugetieren außerdem aus dem Kern.

Wenn man das Hämoglobin aus den roten Blutkörperchen in Lösung bringt, d. h. das Blut lackfarbig macht, so kristallisiert aus vielen Blutarten des Hämoglobin direkt aus, bei anderen bedarf es der Entfernung des Plasmas, der Zufügung von Alkohol, der Kälte oder anderer Beihilfen. Diese sich direkt ausscheidenden Kristalle bestehen nicht aus reinem Hämoglobin, sie werden daher, je nachdem sie Oxyhämoglobin oder reduziertes Hämoglobin enthalten, Arterin und Phlebin genannt. Die Kristallformen sind bei den einzelnen Tieren verschieden, sind also ein Artmerkmal so gut wie die anatomischen Eigentümlichkeiten der Tiere. Meist handelt es sich um Tafeln, Platten, Prismen oder Nadeln, die dem rhombischen System angehören; das Hämoglobin des Eichhörnchens kristallisiert im hexagonalen System, das des Meerschweinchens in Tetraedern. Aber auch bei ein und derselben Tierart, z. B. beim Menschen, kommem verschiedene Kristalle vor, die beim Umkristallisieren ineinander übergehen können. Die verschiedene Kristallform ist indessen nicht das einzige unterscheidende Merkmal zwischen den verschiedenen Hämoglobinen, auch die Löslichkeit wechselt. Rinderhämoglobin zerfließt an der Luft; während das des Eichhörnchens sich erst in 597 Teilen Wasser löst, das des Raben in kaltem Wasser kaum aufgelöst werden kann. In der Wärme ist die Löslichkeit viel größer, von Hundehämoglobin lösen sich in 100 Teilen Wasser bei 5° nur 2 Teile, bei 18° 12 bis 15 Teile. Bei den biologischen Reaktionen (Präzipitierung, Anaphylaxie) zeigen die Hämoglobine Artspezifität (vgl. Abschnitt 4 und die Artikel „Blut" und „Immunität").

Daraufhin nun aber anzunehmen, daß auch die durch oftmaliges Umkristallisieren gereinigten Hämoglobine differente Körper sind, ist nicht gestattet. Es hat sich im Gegenteil ergeben, daß wenigstens die biologisch interessierenden Eigenschaften des Hämoglobins, sein Eisengehalt, sein Gasbindungsvermögen und seine spektralen Eigenschaften bei allen untersuchten Tieren und unter allen physiologischen Bedingungen, beim Menschen auch in Krankheiten, absolut konstant sind, so daß man ein Recht hat, von nur einem Hämoglobin zu reden.

Der Unterschied zwischen diesem ganz reinen Hämoglobin und dem in den lebenden Blutkörperchen im Gemenge, wohl auch in Verbindung mit anderen Stoffen stehenden Hämoglobin ist besonders in einem Punkte wichtig: beide zeigen nämlich eine verschiedene Dissoziationskurve bei wechselndem Sauerstoffdruck.

Der Chemiker also, den die Dissoziation des Oxyhämoglobins als physikalisch-chemischer Gleichgewichtsvorgang interessiert, wird mit einem besonders reinen Hämoglobin arbeiten müssen, der Physiologe, der die Gesetze der Sauerstoffversorgung im tierischen Organismus studieren will, darf nur mit möglichst unverändertem Blut experimentieren. Beide Postulate sind nicht immer erfüllt worden.

Die Hämoglobinkristalle sind undurchsichtig, seidenglänzend und doppelbrechend; ferner haben sie einen sehr ausgesprochenen Pleochroismus. Am schönsten zeigen ihn die Kristalle des reduzierten Hämoglobins; bei Betrachtung mit nur einem Nicol haben sie 3 sehr differente Achsenfarben; blaupurpurn,

Digitized by Google

rotpurpurn, farblos. Die Oxyhämoglobinkristalle zeigen den Pleochroismus weniger gut, aber immerhin deutlich, indem sie je nach der Stellung des Nicols bald dunkel scharlachrot, bald hell gelbrot aussehen. Das Methämoglobin ist dunkel schwarzbraun und hell gelbbraun, bei dünnen Kristallen farblos, das Kohlenoxydhämoglobin purpurn und weiß, das Hämin dunkel schwarzbraun und hell gelbbraun. Ferner zeigen sie entsprechend der Achsenrichtung auch verschiedene Spektralerscheinungen, indem die Streifen nach dem roten oder dem violetten Ende des Spektrums verschoben sind.

Durch Liegen, Eintrocknen, Alkoholwirkung usw. werden die Kristalle denaturiert und in Pseudomorphosen verwandelt; doch können sie einen Teil ihrer optischen Eigenschaften, z. B. die Doppelbrechung dabei noch eine Zeit lang bewahren.

Außer in den roten Blutkörperchen kommt Hämoglobin in den Muskeln vor. Man unterscheidet hämoglobinarme, weiße, von hämoglobinreichen, roten oder braunen Muskeln, beide Arten verhalten sich physiologisch nicht ganz gleich. Von den bekannteren Haustieren haben Huhn, Taube, Kaninchen weiße, Hund, Rind, Wild überwiegend rote Muskeln. Endlich kommt das Hämoglobin bei manchen Wirbellosen, Weichtieren, Crustaceen und Würmern im Blute vor, aber nicht, wie bei den Wirbeltieren, in Blutkörperchen, sondern in Lösung.

Die Verbindungen des Hämoglobins mit Gasen und seine optischen Eigenschaften. Oxyhämoglobin. Bekanntlich sättigt sich das Blut der Wirbeltiere in den Lungen mit Sauerstoff und gibt diesen auf seinem Kreislauf durch den Körper an die Gewebe ab; das arterielle, sauerstoffhaltige Blut ist hellrot, das venöse, sauerstoffarme, dunkler rot bis purpurfarben, das sauerstofffreie Erstickungsblut ist noch viel dunkler, fast schwarz. Diese Sauerstoffaufnahme und die damit verbundene Farbenänderung beruht auf den gleichen Eigenschaften des in den roten Blutkörperchen enthaltenen Hämoglobins. Bei der Besprechung des Hämatins ist auseinandergesetzt worden, daß das Eisenatom in 3 möglichen Formen existieren kann: 1. als Ferroeisen ohne Sauerstoff; 2. als Ferroeisen mit locker gebundenem Sauerstoff, vielleicht in einer an die Superoxyde erinnernden Form; 3. als Ferrieisen mit festgebundenem Sauerstoff. Genau so wie das Hämatin und seine Derivate verhält sich nun das Hämoglobin, nur daß bei ihm die Verhältnisse besser gekannt und übersichtlicher sind. Man muß demnach unterscheiden:

1. Hämoglobin ohne Sauerstoff: Hämochromogen, reduziertes Hämoglobin oder Hämoglobin schlechthin.
2. Hämoglobin mit lockerem Sauerstoff: Oxyhämoglobin.
3. Hämoglobin mit festgebundenem Sauerstoff: α-Hämatin, Hämin, Methämoglobin.

Eine Lösung von Hämoglobin nimmt bei Berührung mit einer Sauerstoffatmosphäre, etwa der Luft, auf ein Molekül ein Molekül Sauerstoff auf und geht dabei in das sogenannte Oxyhämoglobin über. Das Hauptkennzeichen der beiden Hämoglobine, des reduzierten und des sauerstoffhaltigen, ist ihr spektrales Verhalten.

Das Oxyhämoglobin hat 2 scharfe, gut begrenzte Spektralstreifen in Gelb und Grün zwischen den Fraunhoferschen Linien D und E, von denen der eine schmälere und schärfer begrenzte dicht neben D beginnt. Der zweite hat für das Auge keine ganz so hohe Intensität wie der erste, doch ist dies bei spektrophotometrischen Messungen nicht der Fall. Ein dritter, etwa ebenso intensiver Streifen liegt im Blauviolett. Hämoglobin absorbiert also gerade das für unser Auge hellste und das chemisch wirksamste Licht.

Das reduzierte Hämoglobin hat im Gelbgrün nur einen Streifen, der ziemlich genau in der Mitte zwischen D und E, somit auch zwischen den Streifen des Oxyhämoglobins gelegen ist. Er ist breiter, aber weniger scharf begrenzt und weniger intensiv als die Streifen des Oxyhämoglobins. Im Violett hat es auch einen Streifen.

Eine Hämoglobinlösung nimmt beim Schütteln mit Luft Sauerstoff auf, wobei das Spektrum des Hämoglobins in das des Oxyhämoglobins übergeht; Blut oder lackfarbenes Blut verhält sich ebenso. Durch reduzierende Agenzien (Stokes' Reagens, Ferrosulfat) wird es wieder in Hämoglobin zurückverwandelt. Die Verwandlung des Oxyhämoglobins in reduziertes geschieht aber auch durch das Vakuum oder durch anhaltendes Durchleiten eines indifferentes Gases, Wasserstoff oder Stickstoff, die Verbindung des O_2 mit dem Hämoglobin ist also eine sehr lockere. 1 g Hämoglobin vermag in maximo 1,34 ccm Sauerstoff zu binden; diese Menge wird aber nur bei einem Ueberschusse, d. h. bei einem hohen Partialdruck der O_2 erreicht. Sinkt dieser, so wird ein Teil des O_2 durch Dissoziation frei. Wieviel O_2 in einer bestimmten Lösung gebunden ist, das wird entweder spektroskopisch ermittelt, indem man bestimmt, welcher Anteil des Hämoglobins Oxyhämoglobin, welcher reduziertes Hämoglobin ist. Oder man verwandelt das Oxyhämoglobin in Methämoglobin (siehe unten) und bestimmt die Menge des frei werdenden O_2. Partialdruck des O_2 und Dissoziation des Oxyhämoglobin stehen — im Blut — in folgender Beziehung (vgl. aber oben):

Digitized by Google

O_2-Druck mm Hg	abgespaltener O_2 %	
5	64	
30	23	(Lungenluft, niedrigster möglicher Barometerdruck)
57	14	(Lungenluft, Monte Rosa)
64	12,5	(—, 2800 m)
95	8,7	(—, 1400 m)
110	7,6	(—, Ebene)
150	5,7	(Atmosphäre, Ebene)

Bei einer graphischen Aufzeichnung würde die Kurve erst bei niederem Druck steil steigen, dann eine breite Umbiegung haben, um endlich von einem Druck an, der etwa $^3/_4$ des Atmosphärendruckes entspricht, sich der maximalen Bindung asymptotisch zu nähern.

Methämoglobin. Hier ist das Eisen des Hämoglobins dreiwertiges Ferrieisen, das infolgedessen keinen Sauerstoff locker anlagern oder abgeben kann. Es ist ein stabiler Körper, der durch Gase nicht beeinflußt wird. Es entsteht aus dem Oxyhämoglobin durch oxydierende Agentien, außerdem aber auch durch viele andere Stoffe, wie Amylnitrit, Antifebrin, Chlorate. Auch im strömenden Blute kann die Methämoglobinbildung vor sich gehen, und die betreffenden Stoffe sind daher giftig. Bei der Oxydation des Hämoglobin zu Methämoglobin entweicht der locker gebundene O_2. Diese Abspaltung des Sauerstoffs bei der Einwirkung von Ferricyankalium auf Oxyhämoglobin ist von Barcroft benutzt worden, um den Sauerstoff des Oxyhämoglobins quantitativ zu bestimmen, und seine Methode ist in den letzten Jahren sehr vielfach angewendet worden. Gestattet sie doch, die Sauerstoffbestimmung in 1 ccm Blut exakt auszuführen. Auchbeim bloßen Liegen geht Oxyhämoglobin bisweilen in das stabilere Methämoglobin über. Durch Reduktionsmittel (Stokes' Reagens, Schwefelammonium) wird Methämoglobin in reduziertes Hämoglobin verwandelt, das dann wieder O_2 anlagern kann.

Das Methämoglobin ist in Substanz und in saurer oder neutraler Lösung nicht schön rot, wie das Oxyhämoglobin, sondern braun, wie englischer Porter, in alkalischer Lösung dagegen ebenfalls rot. Seine Kristalle sind graubraune, rehfarbene Nadeln, die in Masse eine Art Atlasglanz zeigen. In neutraler Lösung hat es einen sehr ausgeprägten Streifen im Orangerot, zwischen C und D, nahe bei C. Ein zweiter Streifen liegt im Hellblauen zwischen G und F, dicht neben F.

Kohlenoxydhämoglobin: Ebenso wie mit dem Sauerstoff geht das Hämoglobin eine Verbindung mit dem Kohlenoxyd ein. Das Kohlenoxydhämoglobin unterscheidet sich von dem Oxyhämoglobin durch seine hellere, mehr kirschrote Farbe; der Schaum ist violett. Die Kristalle sind mit denen des Oxyhämoglobins isomorph, sehen aber dunler, mehr bläulich aus. Die Absorptionsstreifen sind denen des Oxyhämoglobins sehr ähnlich, nur sind sie etwas verschoben, der erste Streifen ist etwas schärfer begrenzt, der zweite Streifen ist weniger intensiv. Die Differenzen gegen das Oxyhämoglobin sind nur erkennbar, wenn die Lösungen direkt verglichen werden können, und auch dann minimal.

Die wichtigste Eigenschaft des Kohlenoxydhämoglobins ist aber seine größere Festigkeit. Es gibt das Kohlenoxyd nur schwer an das Vakuum ab; seine Dissoziation ist 33 mal kleiner als die des Oxyhämoglobins. Bei einem CO-Gehalt der Luft von 0,05% ist der Partialdruck des Sauerstoffs 545 mal größer, und doch sind 27% des Hämoglobins von dem Kohlenoxyd gebunden.

Wegen dieser größeren Festigkeit ist es wiederholt zur Bestimmung des mit dem Hämoglobin verbundenen Gasvolums benutzt worden; auch die früher angegebene endgültige Zahl, die zur Molekulargewichtsbestimmung des Hämoglobins geführt hat, ist an Kohlenoxydhämoglobin gewonnen.

Auf dieser größeren Festigkeit des Kohlenoxydhämoglobins beruht die Fähigkeit des Kohlenoxyds, auch in mäßiger Konzentration Sauerstoff zu verdrängen, und beruht damit auch die Giftigkeit des Kohlenoxyds z. B. im Leuchtgas, welches das Hämoglobin der Blutkörperchen mit Beschlag belegt und so die Zufuhr des Sauerstoffs zu den Geweben verhindert.

Der Tod erfolgt, wenn etwa die Hälfte des Hämoglobins zu Kohlenoxydhämoglobin wird; wird diese Grenze nicht erreicht, so tritt Erholung ein, indem das Kohlenoxyd durch die Massenwirkung des schwächeren Sauerstoffs verdrängt wird.

Infolge dieser größeren Festigkeit der Bindung, wird Kohlenoxydhämoglobin durch Schwefelammonium und das Stokessche Reagens im Unterschied von Oxyhämoglobin nicht reduziert. Da die Streifen des Kohlenoxyd- von denen des Oxyhämoglobins spektroskopisch schwer zu unterscheiden sind, ist dieses Ausbleiben der Reduktion zu Hämoglobin das beste Mittel zum Nachweis des Kohlenoxyds im Blute bei Vergiftungen. Ebenso wird es viel schwerer in Methämoglobin verwandelt, und auch gegen fällende Reagenzien, durch die das Hämoglobin bei der Fällung zerlegt wird, ist das Kohlenoxydhämoglobin viel resistenter; so bewahrt Kohlenoxydhämoglobin bei der Fällung mit Natronlauge, Gerbsäure oder Ferrocyanwasserstoffsäure

Digitized by Google

lange seine schöne rote Farbe, während anderes Hämoglobin rasch zersetzt wird und eine schmutzige, braun-grünliche Färbung annimmt. Dasselbe ist der Fall mit dem Schwefelwasserstoff, der Oxyhämoglobin in kurzer Zeit zerstört, während Kohlenoxydhämoglobin dabei seine rote Farbe und seine Spektralstreifen lange bewahrt. Wenn man den Sauerstoff absorbiert und dadurch die Wirkung des Kohlenoxyds begünstigt, kann man es mittels Tannin noch in einer Verdünnung von 1:40 000 nachweisen.

Stickoxydhämoglobin. Es ist noch beständiger als das Kohlenoxydhämoglobin, und das Stickoxyd verdrängt daher das Kohlenoxyd aus seiner Verbindung. Das Stickoxydhämoglobin bildet Kristalle, die denen des Oxyhämoglobins isomorph sind; seine Lösungen sind hellrot. Im Spektrum zeigt es die gleichen Streifen wie das Kohlenoxydhämoglobin, nur etwas nach dem roten Ende verschoben, also dem Oxyhämoglobin ähnlicher. Es ist ebensowenig reduzierbar wie Kohlenoxydhämoglobin.

Auch mit Schwefelwasserstoff (Sulphurglobin), Blausäure (Cyanmethämoglobin), Acetylen und anderen Gasen geht Hämoglobin Verbindungen ein. Auf einer Verbindung mit Nitriten beruht die rote Farbe von Fleisch, dem Nitrite zur Konservierung zugesetzt sind.

Das Hämocyanin. An Stelle des eisenhaltigen Hämoglobins ist bei Cephalopoden in der Blutflüssigkeit ein kupferhaltiges Proteid enthalten, das Hämocyanin. Das Hämocyanin kristallisiert wie die Albumine aus Ammonsulfatlösung.

Gegen Säuren ist es so empfindlich wie Hämoglobin, indem es in Eiweiß und Kupfer zerlegt wird. Doch ist das Hämocyanin kein Kupfersalz, da es ungespalten die Reaktion des Kupferions nicht gibt.

Das Hämocyanin vermag Sauerstoff zu binden und gibt ihn beim Durchleiten von Wasserstoff, Kohlenoxyd und besonders Kohlendioxyd wieder ab. In reduziertem Zustande ist es farblos, im sauerstoffhaltigen Zustande dagegen zeigt es ein schönes, reines Blau, im Spektrum ist keine Absorption wahrzunehmen. Das Sauerstoffbindungsvermögen ist geringer als das des Hämoglobins. Das Hämocyanin ist der einzige Eiweißkörper im Blut der Cephalopoden, deren Respiration es vermittelt. Außerdem kommt Hämocyanin bei manchen Krebsen vor.

Andere zu den Eiweißkörpern gehörige Farbstoffe, die zum Teil gut kristallisieren, sind das Phykoerythrin aus Meeresalgen, das Phykocyan aus Cyanophyceen und ein blauer Farbstoff, den das Männchen des Fisches Crenilabrus pavo im Frühjahr besitzt.

IV. Die Glycoproteide.

Die prosthetische Gruppe der Glycoproteide ist das Glucosamin. Wenigstens ist es beim Ovimucoid gelungen, durch kurzdauernde Behandlung mit verdünnter Salzsäure direkt Glucosamin darzustellen, frühere Autoren hatten immer nicht reduzierende Kohlenhydratkomplexe erhalten, aus denen erst nachträglich das Glucosamin sich abspalten ließ. Es ist daher immer angenommen worden, die prosthetische Gruppe der Glycoproteide sei ein höheres Kohlenhydrat, und es sei fester an das Eiweiß gebunden, als Hämatin und Nucleinsäure. Für das Ovimucoid scheint es sich anders zu verhalten, weitere Angaben über die Allgemeingültigkeit des Befundes müssen abgewartet werden.

Das Glucosamin hat folgende Struktur:

$$\begin{array}{c} \quad\quad\ H\ \ H\ \ H \\ H_2OHC{-}\overset{|}{C}{-}\overset{|}{C}{-}\overset{|}{C}{-}CH(NH_2)COH \\ \quad\quad\ \underset{}{OH}\,OH\,OH \end{array}$$

Es leitet sich also von der Glucose ab. Nur die sterische Stellung der Aminogruppe ist noch unsicher. Es ist identisch mit dem aus dem Chitin der Gliedertiere dargestellten Glucosamin. Auf dieses Glucosamin lassen sich alle älteren Angaben über das Vorkommen von Zucker im Eiweiß zurückführen, bei denen vereinzelte Befunde an Glycoproteiden fälschlich verallgemeinert wurden.

Zu den Glycoproteiden gehören die Schleimstoffe und ihre Verwandten, das Eieralbumin und noch einige Phosphoglycoproteide. Das Eieralbumin ist bei den Albuminen beschrieben. Hier soll nur die gut kenntliche und scharf abgegrenzte Klasse der Mucine und Mucoide besprochen werden.

Die Mucine und Mucoide sind saure, phosphorfreie Eiweißkörper, aus denen beim Kochen mit Säuren eine reduzierende Substanz hervorgeht. Ihre prozentische Zusammensetzung ist ausgezeichnet durch einen niedrigen Kohlenstoff- und Stickstoff-, einen hohen Sauerstoffgehalt, bedingt durch den Eintritt der sauerstoffreichen Kohlehydratgruppe. Im Zusammenhange damit steht ihre niedrige Verbrennungswärme. Außerdem sind sie relativ reich an Schwefel, was jedenfalls bei einigen Glycoproteiden mit dem Gehalt an Chondroitinschwefelsäure zusammenhängt (siehe unten). Das Kohlenhydrat steigt bis zu 37%, meistens sind nur Minimalwerte bestimmt, die oft viel zu niedrig sind. Von den Farbenreaktionen geben alle Mucine die Biuretreaktion, und zwar mit violetter Farbe wie die eigentlichen Eiweiße, ferner die Xanthoprotein- und die Schwefelbleireaktion, ebenso die nach Millon und Molisch.

Mucine und Mucoide werden durch Erhitzen nicht koaguliert und unterscheiden

Digitized by Google

sich dadurch scharf sowohl von den nativen Eiweißen, wie von den Proteiden. Dagegen zeigen sie eine deutliche Denaturierung, indem sie durch Einwirkung von Säuren und besonders Alkalien, von Alkohol und anderen Fällungsmitteln, durch langes Liegen im ungelösten Zustande usw. ihre physikalischen Eigenschaften verändern und ihren Schleimcharakter verlieren. Diese Umwandlung oder Spaltung kann so wenig wie die Denaturierung der echten Eiweiße rückgängig gemacht werden, sondern ist eine dauernde. Die Glykoproteide sind ausgesprochene Säuren, die Lackmuspapier röten und meist durch Säuren gefällt werden. Durch beide Eigenschaften, die Nichtkoagulierbarkeit, welche die Möglichkeit einer Denaturierung nicht ausschließt, und den Charakter als Säuren, gleichen die Glykoproteide den Phosphoproteiden, von denen sie sich aber durch den mangelnden Phosphor- und den Kohlenhydratgehalt scharf unterscheiden. Als Säuren werden die meisten Glykoproteide durch Essigsäure gefällt und sind auch im Ueberschuß schwer löslich, viel schwerer als die anderen sauren Eiweißkörper, wie Globuline, Phospho- oder Nucleoproteide. Mineralsäuren fällen ebenfalls, lösen aber im Ueberschuß leichter auf. In Alkalien, kohlensauren Alkalien und in Ammoniak sind die Glycoproteide alle sehr leicht löslich und bilden mit ihnen Salze, die neutral, zum Teil auch noch sauer reagieren. Durch einen, auch ganz geringen Ueberschuß von Alkali werden sie sehr leicht denaturiert und zersetzt.

a. Die Mucine. Die Mucine kommen in den meisten schleimigen Flüssigkeiten vor und bedingen dadurch deren Charakter. Sie bilden schon in sehr großer Verdünnung mehr oder weniger schleimige, fadenziehende Lösungen. Sie werden teils von Becherzellen an der Oberfläche aller Schleimhäute, der des Respirations- wie des Verdauungstractus, der Gallengänge, Harnwege usw., teils von großen Schleimdrüsen, besonders einer der Speicheldrüsen, der Glandula submaxillaris, abgesondert. Auch bei Wirbellosen, z. B. den Schnecken, deren Haut mit Schleim überzogen ist, sind sie verbreitet. Andere den Mucinen sehr nahestehende Körper, die den Uebergang zu den Mucoiden bilden, kommen im Bindegewebe, z. B. den Sehnen, im Glaskörper, Nabelstrang usw. vor.; sie werden bei den Mucoiden besprochen. Bei einigen Tieren treten statt der Mucine Phosphoproteide auf, die physikalisch den gleichen Schleimcharakter haben (siehe dort). Genauer untersucht sind die Mucine der Speicheldrüsen, der Respirationsschleimhaut, der Galle, des Froschlaichs, des Barschlaichs und der Schneckenhaut. Das Sputum-Mucin hat die Zusammensetzung C 48,17%, H 6,91%, N 10,8%, S 0,84%; es enthält 37% Glucosamin, andere Mucine enthalten weniger und sind meist N-reicher, Froschlaich-Mucin ist noch N-ärmer.

Das Mucin ist in trockenem Zustande ein weißes, lockeres, kaum hygroskopisches Pulver und kann so jahrelang aufbewahrt werden, ohne seine Eigenschaften zu verändern. Es ist in Wasser und neutralen Salzlösungen sehr schwer löslich, in Säuren unlöslich, bildet aber auf Zusatz von Essigsäure ein zähes, klebriges Gerinnsel. Dagegen löst es sich in sehr verdünnten Alkalien zu einer neutralen Flüssigkeit, die sich bei einem Mucingehalte von 0,228% noch wie eine typische Schleimlösung verhält, klebrig, dickflüssig und fadenziehend. Der natürliche Schleim ist mucinsaures Natrium. Aus dieser Lösung wird das Mucin durch Säuren, insbesondere Essigsäure, gefällt, aber nicht als flockiger Niederschlag, sondern in Form eines zähen, schleimigen Klumpens, der sich beim Umrühren um den Glasstab windet. Im Ueberschuß von Essigsäure löst sich das Mucin nicht, oder doch nur sehr schwer wieder auf, Salzsäure dagegen löst schon bei einer Konzentration von 0,1 bis 0,2%, die freilich noch immer wesentlich höher liegt als bei den Nucleoalbuminen oder Globulinen. Die Säurefällung der Mucine gelingt nur in salzarmen Lösungen, dagegen nicht bei Gegenwart von Chlornatrium oder anderen Neutralsalzen. Durch Kochen wird das Mucin wie alle Glycoproteide nicht koaguliert; auch Zusatz von Essigsäure zu der siedenden Lösung bewirkt keine stärkere Fällung, als sie die Essigsäure auch in der Kälte hervorrufen würde, und bei Zusatz von Chlornatrium, das die Koagulation der eigentlichen Eiweiße ja begünstigt, bleibt sie auch beim Erhitzen ganz aus. Man hat diese Eigenschaften benutzt, um koagulierbares Eiweiß neben Mucin nachzuweisen. Durch Alkohol wird das Mucin gefällt, aber nur bei Gegenwart einer hinreichenden Menge von Neutralsalzen; in salzfreier Lösung entsteht durch den Alkohol nur eine mehr oder weniger starke Opaleszenz. Durch Salpetersäure wird das Mucin gefällt, ebenso durch Schwermetalle. Die Alkaloidreagenzien bewirken in neutraler Lösung keine Fällung, wohl aber fällen sie das im Ueberschuß von Salzsäure gelöste Mucin. Durch Sättigung mit Chlornatrium und Magnesiumsulfat wird das Mucin ausgesalzen. Die Grenzen für Ammonsulfat sind 3,2 und 4,6.

Gegen Säuren ist das Mucin recht resistent, um so leichter wird es durch Alkalien denaturiert. Beim Stehen in ganz schwach alkalischer Lösung wird es zwar anfangs noch durch Essigsäure als typischer Schleim gefällt, bald aber tritt daneben ein flockiger Niederschlag auf, und nach einiger Zeit

Digitized by Google

fällt das gesamte Mucin flockig aus; dann hat auch die Lösung ihre charakteristische physikalische Beschaffenheit verloren, ist dünnflüssig geworden und verhält sich in ihren Reaktionen wie ein gewöhnliches Alkalialbuminat. Pepsin und Trypsin lösen; eine Abspaltung von Kohlenhydrat findet dabei nicht statt. Gegen die Fäulnis sind die Mucine sehr resistent, da ihr eigentümliches physikalisches Verhalten den Fäulnisbakterien das Eindringen erschwert.

In mancher Beziehung abweichend von dem Mucin der Wirbeltiere verhält sich das der Weinbergschnecke, Helix pomatia. Es wird nicht als solches abgesondert, sondern als ein Mucinogen, das sich auch in Alkali nur schwer zu einer zähen, nicht eigentlich schleimigen Flüssigkeit löst. Durch Alkaliwirkung, viel langsamer durch bloßes Stehen in wässeriger Lösung, geht dies Mucinogen dann in typisches Mucin über. Dieselbe Erscheinung, daß von den Schleimdrüsen erst Mucinogen abgesondert wird, das dann erst unter dem Einfluß des Wassers sich in Mucin umwandelt, ist bei dem Mucin der Eihüllen des Barsches und am Seeigel beobachtet und die Erscheinung scheint bei Wirbellosen weit verbreitet zu sein. Das Mucin der Speicheldrüsen der Wirbeltiere besitzt keine solche Vorstufe, sondern ist von vornherein ein wirkliches Mucin.

Das Pseudo- oder Paramucin. In den normalen Graafschen Follikeln, auch bei sogenanntem Hydrops ovarii kommen nur koagulierbare Eiweißkörper vor; dagegen enthalten proliferierende, papilläre oder glanduläre Kystome das sogenannte Pseudomucin und haben infolgedessen einen mehr oder weniger schleimigen oder zähflüssigen Inhalt.

Das Pseudomucin, wie es aus eiweißfreien oder eiweißarmen Kystomflüssigkeiten durch Alkoholfällung gewonnen wird, stellt im trockenen Zustande ein feines, weißes, sehr hygroskopisches Pulver dar. In Wasser löst es sich leicht und bildet bei geringer Konzentration Lösungen, die sich wie Mucinlösungen verhalten; bei stärkerer Konzentration — in Ovarialkystomen finden sich 0,88 bis 10,83% eiweißartige Körper — bildet es eine weißliche, zähe und schleimige Flüssigkeit von dem Aussehen eines dicken Gummischleims. Durch Ansäuern mit Essigsäure oder Salzsäure wird das Pseudomucin im Unterschiede von den echten Mucinen nicht gefällt; auch Salpetersäure fällt nicht, sondern macht die Flüssigkeit nur stärker opaleszierend und dickflüssig. Sonst gibt es die Reaktion der Mucine. In 100 g sind 20 g Glucosamin gefunden, außerdem die meisten Aminosäuren. Eine Abart des Pseudomucins ist das Paramucin, das gelegentlich in Ovarialkystomen gefunden wird, das in Wasser gelöst keine schleimige Flüssigkeit bildet, sondern eine zitternde Gallerte.

Einen dem Pseudomucin recht ähnlichen Körper, der aber nur 45,74% Kohlenstoff und 5,68% Stickstoff enthielt, hat Hammarsten einmal in einem „Ganglion" unbekannten Ursprungs vom Unterschenkel eines Mannes gefunden.

b. Die Mucoide. Unter Mucoiden versteht man eine Reihe von Körpern, die in ihrer Zusammensetzung und ihren Reaktionen eine große Aehnlichkeit mit dem Mucin haben. Sie unterscheiden sich von ihm entweder durch ihre physikalischen Eigenschaften oder durch die mangelnde Fällbarkeit mit Säuren. Sie kommen zum Teil in gelöster Form im Blutserum, im Eiereiweiß und in Ascitesflüssigkeiten vor, zum Teil nehmen sie zusammen mit Kollagen usw. am Aufbau der Gewebe teil. Ihre Abgrenzung von den Mucinen ist willkürlich; die hierher gehörigen Substanzen aus dem Glaskörper, den Sehnen und dem Nabelstrange werden bald als Mucoide, bald als Mucine bezeichnet, ohne daß ihre Eigenschaften erkennbare Differenzen aufweisen. Um den Namen Mucine für die wirklichen, von Epithelien sezernierten Schleimstoffe zu reservieren, sollen alle diese Körper hier bei den Mucoiden behandelt werden.

1. Das Chondromucoid und die Chondroitinschwefelsäure. Ueber die Zusammensetzung des Knorpels siehe oben beim Kollagen.

Das Chondromucoid zeigt die gewöhnlichen Reaktionen der Mucine oder Mucoide; es löst sich in Alkalien zu einer neutralen, dicklichen Flüssigkeit, die von Säuren gefällt wird. Die meisten Schwermetalle fällen, dagegen die Alkaloidreagentien nicht; insbesondere fällt Gerbsäure auch bei Salzgegenwart nicht. Das Mucoid hat im Gegenteil die Eigentümlichkeit, die Fällung anderer Eiweiße, z. B. des Glutins, durch Gerbsäure zu verhindern.

Die Zusammensetzung ist:
C 47,3, H 6,42, N 12,58, S 2,42, O 31,28%, sie entspricht der der Mucine; bemerkenswert ist der hohe Schwefelgehalt von 2,42%, wovon 1,8% der Chondroitinschwefelsäure angehören. Von den Aminosäuren sind die Basen isoliert. Neben ihnen entsteht bei der Spaltung die Chondroitinschwefelsäure oder Glucothionsäure, die etwa 27% des Mucoids ausmacht.

Aus der Chondroitinschwefelsäure wird durch Kochen mit verdünnter Salzsäure der gesamte Schwefel als Schwefelsäure abgespalten, wodurch sich die Chondroitinschwefelsäure als Aetherschwefelsäure charakterisiert. Der Rest ist ein stickstoffhaltiges Kohlenhydrat von sauren Eigenschaften, aus dem nach stufenweisem Abbau endlich

Digitized by Google

Glucosamin, daneben aber noch andere Körper hervorgehen.

Die Chondroitinschwefelsäure reagiert stark sauer und bildet mit Metallen neutrale, meist gut lösliche Salze. In Wasser ist sie leicht löslich und bildet bei genügender Konzentration gummiartige Lösungen. Sie wird durch Zinnchlorür, basisches Bleiacetat, Quecksilberoxydulnitrat, Eisenchlorid und Urannitrat gefällt, durch andere Metalle dagegen ebensowenig wie durch irgendwelche Säuren oder die Alkaloidreagenzien. Durch Eisessig wird sie nur im starken Ueberschuß, durch Alkohol nur bei Salzgegenwart gefällt. Sie reduziert nicht, hält aber, da sie mit ihnen lösliche Salze bildet, Kupferoxyde und andere Metalloxyde in Lösung. Ihre wässerigen Lösungen sind linksdrehend.

Mit Eiweißkörpern, z. B. Glutin, bildet die Chondroitinschwefelsäure unlösliche Salze, die sich wie die Nucleinsäure verhalten, d. h. bei mangelndem Säureüberschuß hydrolytisch dissoziiert werden. Sie selbst fällt daher Eiweiß, ihre Salze dagegen nicht. Für die Reaktionen des Harnmucoids (siehe unten) und mancher Gewebsextrakte ist diese Eigenschaft von Bedeutung.

Die Chondroitinschwefelsäure ist in der Hauptsache ein Bestandteil des Chondromucoids, außerdem aber kommt eine geringe Menge im Knorpel auch frei, beziehentlich als Alkalisalz vor. Außerdem kommt sie in Knochen und Sehnen, der inneren Schicht der Aorta und auch noch in anderen Geweben vor.

Endlich wurde die Chondroitinschwefelsäure regelmäßig und in nicht unbeträchtlicher Menge — etwa 0,05% — im Harn gefunden, wo ihre Gegenwart bei Eiweißreaktionen zu berücksichtigen ist, da sie einerseits nach dem Ansäuern Eiweiß fällt, andererseits manche Eiweißreaktionen, z. B. die mit Gerbsäure, stört. Auch gehört ein Teil der Aetherschwefelsäuren ihr und nicht der Indoxylschwefelsäure usw. an.

2. Mucoide aus Sehnen, Knochen und Lederhaut. Diese Mucoide stimmen in ihren Eigenschaften durchaus mit dem Chondromucoid überein, enthalten auch Chondroitinschwefelsäure. In 100 g Sehne (Achillessehne, Ochse) sind enthalten

Mucoid	1,28 g
Elastin	1,63 g
Kollagen	31,59 g
Asche	0,47 g
Wasser	62,87 g

3. Das Mucoid des Glaskörpers, der Cornea und des Nabelstranges. Es beträgt nach Mörner nur 0,1% der Glasflüssigkeit, bedingt trotzdem ihre physikalische Beschaffenheit, die freilich mehr die einer sehr dünnen Gallerte als einer eigentlichen fadenziehenden Schleimlösung ist. Es gibt die gewöhnlichen Mucinreaktionen; daneben enthält der Glaskörper Spuren von koagulierbarem Eiweiß.

Die Grundsubstanz der Cornea enthält 20, die der Sclera 13% Mucoid, der Rest ist Kollagen. Ob dies Mucoid Chondroitinschwefelsäure enthält, ist nicht bekannt. Es gibt die gewöhnlichen Mucoidreaktionen. Ebenso verhält sich das Mucoid des Nabelstranges.

Das Chordagewebe, das mit dem Nabelstrang sonst Aehnlichkeit hat, enthält kein Mucoid (vgl. Gerüsteiweiße).

4. Das Ovimucoid. In dem Eiereiweiß von Hühner- und anderen Eiern findet sich neben dem bekannten Albumin und Globulin ein Glykoproteid, das Ovimucoid; es bildet etwa den achten Teil der organischen Stoffe, 1,5% der Lösung. Das Ovimucoid wird wie die anderen Mucoide durch Erhitzen nicht koaguliert, aber auch nicht durch Säuren, weder Essigsäure, noch Salz- oder selbst Salpetersäure, gefällt. Ebensowenig wird es durch Metallsalze und die meisten Alkaloidreagenzien gefällt, sondern nur durch Gerbsäure, Phosphorwolframsäure, Bleiacetatammoniak und Alkohol. Die Darstellung kann daher nur so erfolgen, daß man das Albumin und Globulin des Eiereiweißes in der gewöhnlichen Weise durch Erhitzen bei schwach saurer Reaktion koaguliert und im Filtrat das Mucoid durch Alkohol fällt. In trockenem Zustande bildet es spröde, durchsichtige Lamellen, eine konzentrierte Lösung ist gummiartig klebend, eine verdünntere schäumt stark, ist aber nicht fadenziehend. In kaltem Wasser quillt es nur, löst sich aber nicht, wohl aber in heißem Wasser und bleibt dann beim Abkühlen in Lösung.

Ein Teil des Schwefels scheint als Schwefelsäure abspaltbar zu sein, also analog den anderen Mucoiden.

Aus dem Ovimucoid wird, als bisher einzigem Glycoproteid, durch Erwärmen mit Salzsäure direkt Glucosamin abgespalten; es sind gegen 30% gefunden. — Durch Chlornatrium wird das Ovimucoid nicht, durch Natrium- und Magnesiumsulfat nur beim Kochen, durch Ammonsulfat schon in der Kälte ausgesalzen, und zwar fällt es bei $^2/_3$-Sättigung partiell, ganz erst bei vollständiger Sättigung.

5. Das Serummucoid. Im Blutserum findet sich ein Mucoid, das in Eigenschaften und Zusammensetzung dem Ovimucoid sehr nahe steht; isoliert wurden 0,1 bis 0,25 g aus 1 l Serum.

Durch Säurespaltung ließen sich 24% Glucosamin gewinnen. Die Farbenreaktionen sind positiv, mit Ausnahme der

Digitized by Google

Schwefelbleireaktion. Bleiacetat fällt nicht, wohl aber Bleiacetat und Ammoniak.

6. Das Harnmucoid. Ein Mucoid, welches ebenfalls mit dem Ovimucoid Aehnlichkeit hat, aber den echten Mucinen näher steht und durch Essigsäure fällbar ist, ist im menschlichen Harn gefunden. 260 l lieferten 4,3 g. Es ist teils gelöst, teils bildet es die sogenannte Nubecula. Bei manchen Tieren ist es durch ein Nucleoalbumin ersetzt, auch hat die Nucleinsäure aus den Leukocyten des Harns ja schleimartige Eigenschaften.

7. Mucoid aus Ascitesflüssigkeiten. In Transsudaten der Bauchhöhle sind die Eiweißkörper des Plasmas und der Lymphe vorhanden. In entzündlichen Exsudaten der Bauchhöhle und anderer seröser Höhlen ist dagegen ein Mucoid gefunden, welches den Flüssigkeiten ein opaleszierendes Aussehen und eine eigentümlich klebrige Beschaffenheit verleiht. Es ist in reinem Zustande durch Essigsäure fällbar, in der Ascitesflüssigkeit dagegen erst nach Ausfällung des Eiweiß und Entfernung der Salze durch Dialyse oder nach starkem Verdünnen. Bei direktem Zusatz von Essigsäure zu der Exsudatflüssigkeit entsteht keine absetzbare Fällung, sondern die Flüssigkeit wird opaleszenter und klebriger. Bei der Fällung der koagulierbaren Eiweißkörper wird es mitgerissen, läßt sich aber wieder in Lösung bringen. Der Körper wird von den Alkaloidreagenzien, auch von Ferrocyankalium, ferner von Salpetersäure, Kupfersulfat, Eisenchlorid und Bleiacetat gefällt und gibt alle Farbenreaktionen des Eiweiß. Pepsin und Trypsin lösen vollständig. Ammonsulfat fällt bei Halbsättigung vollständig. Durch kurzes Kochen mit Säuren entstehen nur sehr geringe Mengen reduzierender Substanz, so daß Zweifel an der Mucinnatur des Körpers geäußert sind; auch der N-Gehalt von 13 bis 15% ist für ein Mucoid hoch. Da er indessen frei von Phosphor ist und durch Kochen nicht gefällt wird, so ist er einstweilen nur hier unterzubringen.

Die Menge des Körpers ist wie bei allen Mucinen und Mucoiden sehr gering, weniger als 0,5% gegen 3% koagulierbares Eiweiß, während er die physikalische Beschaffenheit der Lösung stark beeinflußt. In der Synovialflüssigkeit ist an Stelle oder neben dem Mucoid ein Phosphoproteid vorhanden. Bisweilen kommen auch in Exsudaten phosphorhaltige Eiweiße vor.

8. Mucoid der Eihüllen der Cephalopoden. Die Eier der Tintenfische sind von einer derben, elastischen Hülle umgeben, dem erhärteten Sekret der Nidamentaldrüsen. Sie besitzt die Zusammensetzung der Mucoide; durch Kochen mit Säuren entsteht aus ihr, mit einer Ausbeute von 36 bis 39%, eine amidierte Hexose. Ebenso besteht die Eihülle von Loligo aus einem Glycoproteid und läßt sich aus den Eihüllen von Octopus Glucosamin gewinnen, ebenso aus der Grundsubstanz des Gallertschwammes Chondrosia reniformis.

c) Die Phosphoglykoproteide. Es sind dies Körper, die mit den Mucinen und Mucoiden nur ihren Kohlehydratgehalt gemein haben und die außerdem Phosphor enthalten. Vitellin und Ichthulin sind bei den Phosphoproteiden besprochen worden, hier soll das sogenannte Helicoproteid aus der Eiweißdrüse der Weinbergschnecke aufgeführt werden, das sonst nicht unterzubringen ist. Es hat die Zusammensetzung: C 46,99, H 6,78, N 6,08, S 0,62, P 0,47, weicht also von allen sonst bekannten Eiweißen erheblich ab. Es bildet eine weißlich opaleszierende Lösung, wird durch Kochen nicht koaguliert, aber durch Essigsäure in salzfreier Lösung gefällt. Salpetersäure und Salzsäure fällen und lösen im Ueberschuß. Durch Pepsinsalzsäure fällt ein Nuclein oder Pseudonuclein. Von Xanthinbasen ist nichts bekannt. Durch Kochen mit Salzsäure oder Kalilauge entstehen Albuminate, Albumosen und ein höheres Kohlenhydrat, das Sinistrin. Das Sinistrin dreht links, gärt nicht, reduziert nicht und gibt keine Jodreaktion. Von Ptyalin wird es nicht angegriffen, durch Kochen mit Säuren aber in ein reduzierendes, rechtsdrehendes Kohlehydrat überführt.

Literatur. *Zu 1: Zusammenfassende Darstellung der Eiweißchemie:* **O. Cohnheim**, *Chemie der Eiweißkörper. 3. Aufl. Braunschweig 1911. — Diese Darstellung ist hier zugrunde gelegt und benutzt.*

Zu 2: Monoaminosäuren: **Emil Fischer**, *Zahlreiche Aufsätze in Zeitschr. f. physiolog. Ch. u. Ber. d. deutsch. chem. Ges. 1899 bis 1906. Zusammengefaßt in „Untersuchungen über Aminosäuren, Peptide u. Proteine". Berlin 1906. — Basen:* **A. Kossel**, *Zahlreiche Aufsätze in Zeitschr. f. physiol. Ch. 1900 bis 1910. Methodik insbesondere Band 31, 41, 42, 49, 68. — Carbaminoreaktion:* **M. Siegfried**, *Ergebnisse der Physiol. 9. (1910). Zeitschr. f. physiolog. Ch. 44, 46, 54. — Humin:* **O. Schmiedeberg**, *Arch. f. exper. Path. u. Pharm. 39. —* **E. Hart**, *Zeitschr. f. physiol. Ch. 33.*

Zu 3: Die oben bei 2 zitierten Arbeiten von **Emil Fischer**, *Synthetische Peptide sind auch nach 1907 von* **Fischer und Abderhalden** *dargestellt worden. — Arginin: Die Arbeiten von* **A. Kossel**, *besonders Zeitschr. f. physiol. Ch. 41, 42, 49, 60. Biochem. Zentralbl. 5.*

Zu 4: Siehe Literatur zum speciellen Teil. Für die Pflanzeneiweiße und die Frage der vollständigen Auflösbarkeit: **T. B. Osborne**, *Ergebnisse der Physiologie 10, 47 bis 215 (1910). Vegetable Proteins, London 1909.*

Zu 5: Peptide: **E. Fischer und E. Abderhalden**, *Zeitschr. f. physiol. Ch. 39, 46, 51. — Trypsin:* **W. Kühne**, *Virchows Arch. 39. —*

Digitized by Google

F. Kutscher, *Zeitschr. f. physiol. Ch. 28.* — **E. Fischer und E. Abderhalden,** *39, 46.* — *Formoltitrierung:* **S. P. L. Sörensen,** *Biochem. Zeitschr. 7.* — **Henriquez und Gjaldbäk,** *Z. f. physiol. Ch. 67.* — *Papayotin:* **Neumeister,** *Zeitschr. f. Biol. 26.* — **Siegfried,** *Z. f. physiol. Ch. 38.* — **Kutscher und Lohmann,** *ebenda 46.* — *Erepsin:* **O. Cohnheim,** *Z. f. physiol. Ch. 33, 35, 49, 51, 69.* — **E. Abderhalden und Mitarbeiter,** *ebenda 49, 51, 61, 66.* — *Hefe:* **M. Hahn,** *Z. f. Biol. 40.* — **F. Kutscher,** *Zeitschr. f. physiol. Ch. 32, 34.* — **E. Abderhalden,** *ebenda 51, 54, 55.* — *Pflanzen:* **E. Schulze,** *ebenda 24, 33, 45, 47, 65.* — **E. Abderhalden,** *ebenda 49.* — **S. H. Vines,** *Annals of Botany 17 bis 20.* — *Autolyse:* **E. Salkowski,** *Z. f. klin. Med. 17, Suppl.;* **M. Jacoby,** *Zeitschr. f. physiol. Ch. 30, 32.* — **H. D. Dakin,** *Journ. of Physiol. 30.* — *Arginase:* **Kossel und Dakin,** *Z. f. physiol. Ch. 41, 42.*

Zu **6**: *Alkalispaltung:* **E. Fischer,** *Z. f. phys. Ch. 35.* — **H. Steudel,** *ebenda 35.* — **A. Kossel und F. Weiss,** *ebenda 59, 68.* — *Permanganat:* **G. Zickgraf,** *ebenda 41.* — **R. Bernert,** *ebenda 26.* — *Wasserstoffsuperoxyd:* **H. D. Dakin,** *Journ. of Biolog. Chem. 1.* — *Salpetersäure:* **O. v. Fürth,** *Habilitationsschrift. Straßburg 1899.* — **A. Kossel und F. Weiss,** *Z. f. physiol. Ch. 78.* — *Brom:* **Hlasiwetz und Habermann,** *Liebigs Ann. 159.* — *Hefe:* **F. Ehrlich,** *Biochem. Zeitschr. 2, 18.* — **H. Pringsheim,** *ebenda 10.* — *Fäulnis:* **D. Ackermann und F. Kutscher,** *Zeitschr. f. physiol. Ch. 69.* — **A. Ellinger,** *ebenda 29, 62, 65.* — *Pflanzen:* **E. Schulze,** *ebenda 24, 26, 30, 33, 35, 47, 65, 67, 69.* — *Tiere: Desamidierung:* **O. Cohnheim,** *ebenda 59, 76.* — *Leber:* **O. Neubauer,** *ebenda 67.* — *Acetessigsäure:* **G. Embden,** *Hofmeisters Beitr. 6, 8, 11, Biochem. Zeitschr. 27.* — *Alkaptonurie:* **Falta u. Langstein,** *Zeitschr. f. physiol. Ch. 37.* — **E. Friedmann,** *Hofmeisters Beitr. 11.* — *Cystinurie:* **A. E. Garrod,** *Journ. of Physiol. 34.* — *Diaminurie:* **E. Baumann,** *Zeitschr. f. physiol. Ch. 13, 15.* — *Agmatin:* **A. Kossel,** *ebenda 66, 68.* — *Methylierungen:* **D. Ackermann und F. Kutscher,** *ebenda 69.* — *Kynurensäure:* **A. Ellinger,** *ebenda 43.* — *Glykokoll:* **A. Magnus-Levy,** *Biochem. Zeitschr. 6.* — *Zucker und Eiweiß:* **G. Lusk,** *Zeitschr. f. physiol. Ch. 66.* — *Glukosamin:* **R. Fabian,** *ebenda 27.* — *Tryptophan:* **A. Ellinger,** *Hofmeisters Beitr. 4.* — *Methylmerkaptan nach Spargeln:* **M. Nencki,** *Arch. f. exper. Path. u. Pharm. 28.* — *Melanin:* **O. v. Fürth,** *Hofmeisters Beitr. 1, 10.* — **M. Nencki,** *Ber. deutsch. chem. Ges. 28.*

Zu **8**: *Albumosen:* **W. Kühne,** *Zeitschr. f. Biol. 29.* — **R. Neumeister,** *ebd. 26.* — **F. Hofmeister,** *Ergebnisse der Physiologie, I, Biochemie.* — *Pepsinpepton:* **M. Siegfried,** *Zeitschr. f. physiol. Ch. 38, 45, 65.* — *Histopepton:* **A. Kossel,** *ebd. 49.* — *Hemielastin:* **L. Borchardt,** *ebd. 51.* — *Plastein:* **W. W. Sawjalow,** *ebd. 54.* — *Kyrine:* **M. Siegfried,** *ebd. 43, 48, 50.* — *Protone:* **A. Kossel,** *ebd. 49.* — *Säure-Peptide:* **E. Fischer und E. Abderhalden,** *Ber. deutsch. chem. Ges., 39, 40.* — **E. Abderhalden,** *Zeitschr. f. physiol. Ch. 58, 62, 63, 64, 65, 66.* — *Acidalbumosen:* **M. Dennstedt und P. Hassler,** *ebd. 48.* — **R. Neumeister,** *Zeitschr. f. Biol. 26, 36.* — *Alkalialbumosen:* **O. Maas,** *Zeitschr. f. physiol. Ch., 30.* — **A. Kossel,** *ebd. 59, 60, 68.* — *Antipepton:* **M. Siegfried,** *ebd. 35, 38, 45, 54.* — **E. Fischer und E. Abderhalden,** *ebd. 39, 40.* — *Fleischextrakt:* **K. Mays,** *ebd. 78.* — *Oxyproteinsäure:* **F. Pregl,** *Pflügers Arch. 75.* — **E. Abderhalden und F. Pregl,** *Zeitschr. f. physiol. Ch. 46.* — *Pflanzensamen:* **M. Siegfried und W. R. Mack,** *ebd. 42.* — **T. B. Osborne,** *Ergebnisse der Physiologie, 10.* — *Tritonium:* **M. Henze,** *Ber. deutsch. chem. Ges. 34.*

Zu **9**: *Amphotere Elektrolyte:* **K. Winkelblech,** *Zeitschr. f. physikal. Ch. 36.* — *Hydrolyse:* **J. Sjögvist,** *Skandinav. Art. f. Physiol. 5.* — **O. Cohnheim,** *Zeitschr. f. Biol. 33.* — **T. Br. Robertson,** *Ergebnisse der Physiologie 10.* — *Undissocierte Salze:* **T. B. Osborne,** *Zeitschr. f. physiol. Ch. 33; l. c.* — **T. Br. Robertson,** *l. c.* — *Alkohollösliche Salze:* **F. Simon,** *Zeitschr. f. physiol. Ch. 66.* — *Schwermetallsalze:* **G. Galeotti,** *ebd. 40, 42, 48.* — *Anilinfarben:* **M. Heidenhain,** *Pflügers Arch. 90, 96.* — **G. Mann,** *Physiological Histology, methods and theory, Oxford 1902.*

Zu **10**: *Jodeiweiße:* **Blum,** *Journ. f. pr. Ch. (2) 56, 57. Zeitschr. f. physiol. Ch. 28.* — **F. Hofmeister,** *ebd. 24.* — **D. Kurajeff,** *ebd. 26, 31.* — **A. Oswald,** *Hofmeisters Beitr. 3, Zeitschr. f. physiol. Ch. 58, 59, 60, 62.* — *Bromeiweiß:* **Blum,** *l. c.* — **F. G. Hopkins,** *Ber. deutsch. chem. Ges. 30, 31.* — *Fluoreiweiß:* **Blum,** *l. c.* — **S. W. Gans,** *Chem. Centralbl. 1901.* — *Schilddrüse:* **A. Oswald,** *Zeitschr. f. physiol. Ch. 27, 32, 62.* — *Korallen:* **C. T. Mörner,** *ebd. 51, 55.* — **M. Henze,** *ebd. 51.* — *Schwämme:* **E. Harnack,** *ebd. 24.* — *Nitrokörper:* **O. v. Fürth,** *Habilitationsschrift, Straßburg 1899.* — **A. Kossel,** *Zeitschr. f. physiol. Ch. 72, 76.* — *Oxyprotsulfonsäure:* **O. v. Fürth,** *Hofmeisters Beitr. 6.* — *Oxyprotein:* **F. N. Schulz,** *Zeitschr. f. physiol. Ch. 29.* — *Ozon:* **C. Harries und K. Langheld,** *ebd. 51.* — *Formaldehyd:* **S. Schwarz,** *ebd. 31.* — *Ester:* **H. Bechhold,** *ebd. 34.* — *Diazoverbindungen:* **Z. Treves und G. Salomone,** *Biochem. Zeitschr. 7.* — *Silber:* **Schadee van der Does,** *Zeitschr. f. physiol. Ch. 24.* — *Osmiumsäure:* **A. Bethe,** *Arch. f. mikroskop. Anatomie 54.*

Zu **11**: *Molekulargröße:* **F. Hofmeister,** *Zeitschr. f. physiol. Ch. 24.* — **G. Hüfner,** *Arch. f. (Anat. u.) Physiol. 1894.* — **J. Barcroft,** *Journ. of Physiol. 39.* — **E. W. Reid,** *ebd. 31, 33.* — *Verbrennungswärme:* **F. Stohmann und H. Langbein,** *Journ. f. pr. Ch. (2) 44.* — **F. G. Benedict und T. B. Osborne,** *Journ. of Biolog. Chem. 3.* — *Polarisation:* **L. Frédéricq,** *Arch. de Biol. 1, 2.* — *Refractometrie:* **T. Br. Robertson,** *Journ. of Physical. Chem. 6, 7.* — **E. Reiss,** *Hofmeisters Beitr. 4.* — *Ultramikroskop:* **E. Rählmann,** *Pflügers Arch. 112.* — **E. W. Reid,** *Journ. of Phys. 31, 33.* — *Goldzahl:* **F. N. Schulz und R. Zsigmondy,** *Hofmeisters Beitr. 3.* — *Oberflächenwirkung:* **W. Ramsden,** *Arch. f. (Anat. u.) Phys. 1894.* — **F. W. Zahn,** *Pflügers Arch. 2.* — *Ausflockung:* **L. Michaelis und P. Rona,** *Biochem. Zeitschr. 2—6.* — *Aussalzen:* **W. Kühne,** *Zeitschr. f. Biol. 29.* — **F. Hofmeister,** *Zeitschr. f.*

Digitized by Google

physiol. Ch. 14. — *Arch. f. exper. Path. u. Pharm. 24, 25.* — **O. Hammarsten,** *Pflügers Arch. 19, 22.* — **E. P. Pick,** *Zeitschr. f. physiol. Ch. 24.* — *Kristalle:* **F. Hofmeister,** *Zeitschr. f. physiol. Ch. 14, 16.* — **F. N. Schulz,** *Eiweißkristalle, Jena 1901.* — **A. Wichmann,** *Zeitschr. f. physiol. Ch. 27.* — **K. A. H. Mörner,** *ebd. 34.* — *Wärmekoagulation:* **W. Erb,** *Zeitschr. f. Biol. 41.* — **O. Cohnheim,** *Zeitschr. f. physiol. Ch. 33.* — **T. B. Osborne,** *Ergebnisse der Physiol. 10.* — **S. Ringer,** *Journ. of Physiol. 12.* — *Koagulationstemperatur:* **H. Chick und R. H. Martin,** *Journ. of Physiol. 40.* — **W. Pauli,** *Hofmeisters Beitr. 11.* — *Trockenes Erhitzen:* **H. Chick und R. H. Martin,** *Journ. of Physiol. 40.* — *Reversibilität der Fällungen:* **K. Spiro,** *Hofmeisters Beitr. 4.* — *Spaltung durch Säure und Alkali:* **J. E. Johannsson,** *Zeitschr. f. physiol. Ch. 9.* — **O. Zoth,** *Monatshefte f. Chemie 1891.* — **A. Rollet,** *ebd. 1881.*

Zu **12**: *Einteilung:* **O. Cohnheim,** *Chemie der Eiweißkörper, 3. Aufl. Braunschweig 1911.* — *Bericht der englischen und amerikan. Nomenklaturkommissionen, Journ. of Physiol. 35, 38. Americ. Journ. of Physiol. 21. Arch. internat. de Physiol. 5.*

Serumalbumin: Spaltungsprodukte: **E. Abderhalden,** *Zeitschr. f. physiol. Ch. 37.* — *Analyse:* **A. Michel,** *Würzburger mediz. Verein 1895.* — *Antitrypsin:* **S. G. Hedin,** *Zeitschr. f. physiol. Ch. 52.*

Eieralbumin: Analysen: **F. Hofmeister,** *Zeitschr. f. physiol. Ch. 16, 24.* — **F. N. Schulz,** *ebd. 25, 29.* — *Spaltungsprodukte:* **E. Abderhalden und F. Pregl,** *ebd. 46.* — **T. B. Osborne,** *Americ. Journ. Physiol. 15.* — *Glucosamin:* **F. Müller,** *Zeitschr. f. Biol. 42.* — **L. Langstein,** *Zeitschr. f. physiol. Ch. 31.* — *Beimengungen:* **F. N. Schulz und R. Zsigmondy,** *Hofmeisters Beitr. 3.* — *Schwefel:* **Mörner,** *Zeitschr. physiol. Ch. 34.*

Milchalbumin: Spaltungsprodukte: **E. Abderhalden und H. Pribram,** *Zeitschr. f. physiol. Ch. 51.* — **E. Winterstein und E. Strickler,** *ebd. 47.*

Globuline: **W. B. Hardy,** *Journ. of Phys. 33.* — **J. Mellanby,** *ebd. 33.* — **T. B. Osborne,** *Americ. Journ. of Phys. 14.* — **O. Hammarsten,** *Zeitschr. f. physiol. Chem. 8.*

O. Hammarsten, *Ergebnisse der Physiologie 1, Biochemie.* — *Spaltungsprodukte:* **E. Abderhalden und Slavu,** *Zeitschr. f. physiol. Ch. 59.*

Fibrinogen und Fibrin: **O. Hammarsten,** *Pflügers Arch. 14, 19, 22, 30. Zeitschr. f. physiol. Ch. 22, 28.* — *Spaltungsprodukte:* **E. Abderhalden und A. Voitinovici,** *ebd. 52.*

Pereaglobulin: **C. T. Mörner,** *Zeitschr. f. physiol. Ch. 40.*

Bence-Jonessches Eiweiß: **A. Magnus-Levy,** *Zeitschr. f. physiol. Ch. 30.* — **A. Grutterinck und C. J. Weevers de Graaff,** *ebd. 34, 46.*

Myosin: **W. Kühne,** *Arch. f. (Anat. u.) Physiol. 1859.* — **O. v. Fürth,** *Arch. f. exper. Path. u. Pharm. 36; Zeitschr. f. physiol. Ch. 31; Ergebnisse der Physiologie 1, Biochemie.* — **M. H. Fischer,** *Pflügers Arch. 124.* — *Spaltungsprodukte:* **E. Abderhalden und T. Sasaki,** *Zeitschr. f. physiol. Ch. 51.* — **T. B. Osborne,** *Americ. Journ. of Physiol. 15, 22, 23, 24.*

Pflanzeneiweiße: **T. B. Osborne,** *Ergebnisse der Physiologie 10.*

Histone: **A. Kossel,** *Zeitschr. f. physiol. Ch. 8, 49.*

Protamine: **A. Kossel,** *Biochem. Zentralbl. 5.* — *Zeitschr. f. physiol. Ch. 41, 42, 49, 59, 60, 66, 78.*

Kollagen: **A. Ewald,** *Zeitschr. f. Biol. 26.* — *Analysen:* **W. S. Sadikoff,** *Zeitschr. f. physiol. Ch. 39, 41, 46, 48.* — **C. T. Mörner,** *ebd. 28.* — *Spaltungsprodukte:* **P. A. Levene und W. A. Beatty,** *ebd. 49.* — *Gerbsäure:* **H. Trunizel,** *Biochem. Zeitschr. 26.* — *Salze:* **W. Pauli und P. Rona,** *Hofmeisters Beitr. 2.* — *Hornhaut, Sclera:* **C. T. Mörner,** *Zeitschr. f. physiol. Ch. 18.* — *Fischschuppen:* **Derselbe,** *ebd. 24.* — *Knorpel: Skandinav. Arch. f. Physiol. 1.* — *Knochen:* **H. Weiske,** *Zeitschr. f. physiol. Ch. 7.*

Keratin: **K. A. H. Mörner,** *Zeitschr. f. physiol. Ch. 34.* — **H. Buchtala,** *ebd. 52.* — *Spaltungsprodukte:* **E. Abderhalden,** *ebd. 46, 52, 57.* — *Eischalen:* **H. Buchtala,** *ebd. 56.* — *Neurokeratin:* **A. Argiris,** *ebd. 54.* — *Koilin:* **F. B. Hoffmann und F. Pregl,** *ebd. 52.*

Elastin: Spaltungsprodukte: **E. Abderhalden und A. Schittenhelm,** *Zeitschr. f. physiol. Ch. 41.* — **E. Wechsler,** *ebd. 67.* — *Verdaulichkeit:* **A. Ewald,** *Zeitschr. f. Biol. 26.*

Fibroin: **E. Fischer und Skita,** *Zeitschr. f. physiol. Ch. 33, 35.* — **E. Abderhalden,** *ebd. 58, 59, 61, 62, 64, 68.* — *Spinnenseide:* **E. Fischer,** *ebd. 53.*

Spongin: **E. Abderhalden und Strauss,** *Zeitschr. f. physiol. Ch. 48. Vgl. § 10.*

Konchiolin: **C. Voit,** *Zeitschr. f. wiss. Zool. 10.* — **G. Wetzel,** *Zeitschr. f. physiol. Ch. 26.*

Amyloid: **M. Mayeda,** *Zeitschr. f. physiol. Ch. 58.*

Ichthylepidin: **C. T. Mörner,** *Zeitschr. f. physiol. Ch. 24, 37.* — **E. H. Green und R. W. Tower,** *ebd. 35.* — **E. Abderhalden und Voitinovici,** *ebd. 52.*

Sarkolemm usw.: **R. H. Chittenden,** *Untersuchungen a. d. physiologischen Institut Heidelberg 3.* — *Membranin und Linse:* **C. T. Mörner,** *Zeitschr. f. physiol. Ch. 18.* — *Chorda:* **A. Kossel,** *ebd. 15.* — *Reticulin:* **M. Siegfried,** *Habilitationsschrift, Leipzig 1892.* — *Regenwurm:* **B. Sukatschoff,** *Zeitschr. f. wiss. Zool. 66.*

Phosphoproteide: **R. H. A. Plimmer und W. M. Bayliss,** *Journ. of Physiol. 33, 38.* — **O. Hammarsten,** *Zeitschr. f. physiol. Ch. 19.* — **E. Salkowski,** *ebd. 32.*

Casein: **O. Hammarsten,** *Zeitschr. f. physiol. Ch. 7, 9, 22, 56, 68.* — **J. P. Pawlow und S. Parastschuk,** *ebd. 42.* — **W. W. Sawitsch,** *ebd. 55, 63, 68.* — **E. Abderhalden und A. Schittenhelm und L. Langstein,** *ebd. 47, 66.* — **G. Courant,** *Pflügers Arch. 50.*

Vitellin: **T. B. Osborne und D. Br. Jones,** *Americ. Journ. of Physiol. 24.* — **R. H. A. Plimmer und F. Scott,** *Journ. of Physiol. 38, 39.*

Ichthulin: **G. Walter,** *Zeitschr. f. physiol. Ch. 15.* — **O. Hammarsten,** *Skandinav. Arch. f. Physiol. 17.*

Digitized by Google

Schleimige Phosphoproteide: **S. Lönnberg**, *Arch. f. Physiol. 3.*
Nucleinsäure: **H. Steudel**, *Zeitschr. f. physiol. Ch. 77.* — *Guanylsäure:* **H. Steudel**, *ebd. 68.*
A. Neumann, *Arch. f. (Anat. u.) Physiol. 1899. Suppl.* — **O. Schmiedeberg**, *Arch. f. exper. Path. u. Pharm. 43, 57.* — **A. Kossel**, *Arch. f. (Anat. u.) Physiol. 1891.* — *Eisen:* **E. Masing**, *Zeitschr. f. physiol. Ch. 66.* — **A. Ascoli**, *ebd. 28.*
Nucleoproteide: **Fr. Sachs**, *Zeitschr. f. physiol. Ch. 46.* — **A. Schittenhelm**, *ebd. 63, 66.* — **W. Jones**, *ebd. 48.*
A. Kossel, *Arch. f. (Anat. u.) Physiol. 1891, 1893.* — **L. Lilienfeld**, *ebd. 1892.*
Sperma: **H. Steudel**, *Zeitschr. f. physiol. Ch. 77.*
Thymus: **L. Lilienfeld**, *Zeitschr. f. physiol. Ch. 18.* — **W. Huiskamp**, *ebd. 32, 34.*
Vogelblut: **D. Ackermann**, *Zeitschr. f. physiol. Ch. 43.*
Pankreas: **H. Steudel**, *Zeitschr. f. physiol. Ch. 53.*
Hefe: **A. Kossel und H. Steudel**, *Zeitschr. f. physiol. Ch. 38.* — **H. Steudel**, *ebd. 77.* — *Weizen:* **T. B. Osborne und J. F. Harris**, *ebd. 36.*
Hämatin: **W. Küster**, *Zeitschr. f. physiol. Ch. 66.* — **Liebigs** *Ann. 346.* — **R. Willstätter**, *ebd. 358, 371.* — *Spektroskopie:* **A. Gamgee**, *Zeitschr. f. Biol. 34.* — **L. Lewin, H. Miethe und E. Stenger**, *Pflügers Arch. 118.* — **E. Rost, Fr. Franz und R. Heise**, *Arbeiten a. d. Kais. Gesundheitsamt 32.*
Globin: **F. N. Schulz**, *Zeitschr. f. physiol. Ch. 24.* — **E. Abderhalden**, *ebd. 37, 51.*
Hämoglobin: **E. E. Butterfield**, *Zeitschr. f. physiol. Ch. 62.* — **W. Preyer**, *Blutkristalle, Jena 1871.* — **H. U. Kobert**, *Zeitschr. f. angewandte Mikroskopie* **5**, *6—10 (1910).* — **E. T. Reichert und A. B. Brown**, *Differentiation and Specificity of corresponding Proteins etc. Crystallography of Hämoglobins. Washington 1910 (große Monographie); vgl. auch* **W. Friboes**, *Pflügers Arch. f. d. ges. Physiol.* **98**, *434 (1903).* — **A. Uhlik**, *ebd.* **104**, *64 (1904).*
Spectra, s. o. beim Hämin. Gase: **G. Hüfner**, *Arch. f. (Anat. u.) Physiol. 1901, Suppl.; 1895, 1899.*
Hämocyanin: **M. Henze**, *Zeitschr. f. physiol. Ch. 33.*
Glucosamin: **Fr. Müller**, *Zeitschr. f. Biol. 42.* — **A. Oswald**, *Zeitschr. f. physiol. Ch. 68.* — **E. Fischer und H. Leuchs**, *Ber. deutsch. chem. Ges. 36.*
Mucin: **Fr. Müller**, *Zeitschr. f. Biol. 42.* — **O. Hammarsten**, *Zeitschr. f. physiol. Ch. 12; Pflügers Arch. 36.*
Pseudomucin: **O. Hammarsten**, *Zeitschr. f. physiol. Ch. 6.* — **J. Otori**, *ebd. 42, 43.* — **K. Mitjukoff**, *Arch. f. Gynäkol. 49.*
Knorpel: **C. T. Mörner**, *Skandinav. Arch. f. Phys. 1.* — **M. Mayeda**, *Zeitschr. f. physiol. Ch. 58.*
Knochen, Sehnen: **W. J. Gies**, *Americ. Journ. of Physiol. 5. u. 6.*
Auge: **C. T. Mörner**, *Zeitschr. f. physiol. Ch. 18.*
Ovimucoid: **C. T. Mörner**, *Zeitschr. f. physiol. Ch. 18.*
Harn: **K. A. H. Mörner**, *Skandinav. Arch. f. Phys. 6.*
Ascites: **F. Umber**, *Deutsch. Arch. f. klin. Med. 48.* — **R. Stähelin**, *Münchener Mediz. Woch. 1902.*
Eier: **O. v. Fürth**, *Hofmeisters Beitr. 1.*

O. Cohnheim.

Elastizität.

Einleitung: I. Die Grundlagen der Elastizitätslehre. 1. Der Spannungszustand. 2. Der Deformationszustand. 3. Beziehungen zwischen Spannungen und Deformationsgrößen. Das Hookesche Gesetz. 4. Deutung der Elastizitätskonstanten. 5. Die Ziele der mathematischen Elastizitätstheorie. 6. Formänderungsarbeit. Minimalprinzipe. II. Elastizität von Stäben und Fäden. 1. Zug und Druck. 2. Biegung. 3. Torsion. 4. Experimentelle Resultate über Elastizitätskonstanten: a) Elastizitäts- und Gleitmodul. b) Poissonsche Verhältniszahl. c) Abweichungen vom Hookeschen Gesetz. d) Beziehungen zur Molekulartheorie. e) Temperaturabhängigkeit der Elastizitätskonstanten. 5. Elastische Stabilität. 6. Elastizität ursprünglich krummer Stäbe (Federn). III. Elastizität von Platten und Schalen. 1. Ebene Platten. 2. Rohre und Schalen. IV. Dreidimensionale Probleme. 1. Beanspruchung durch allseitigen Druck. 2. Deformation einer Kugel. Elastizität der Erde. 3. Berührung fester Körper. V. Die Hysteresiserscheinungen. VI. Elastische Nachwirkung. 1. Gedämpfte Schwingungen. Logarithmisches Dekrement. 2. Verzögerte Deformation und Relaxation. 3. Die Boltzmannsche Theorie der elastischen Nachwirkung. 4. Schlußbemerkungen.

Einleitung. Die Elastizitätslehre beschäftigt sich mit jenen Deformationen der Körper, die durch mechanische Kräfte hervorgerufen werden. Die Erfahrung zeigt, daß diese bei festen Körpern — wenigstens innerhalb gewisser Grenzen — zum größten Teile rückgängig werden, falls die Kraftwirkung aufhört. Den rückgängigen Teil der Deformation nennt man „elastisch". Bei Flüssigkeiten und Gasen ist nur die Volumänderung rückgängig; man spricht also bei diesen Stoffen nur von „Volumelastizität", während man den festen Körpern „Volum"- und „Gestaltselastizität" zuschreibt.

In dieser einfachen Weise erscheinen allerdings die Verhältnisse nur in erster Annäherung. Zunächst ist es bei festen Körpern nur für die erste flüchtige Betrachtung richtig, daß jeder Kraftwirkung (Belastung, Beanspruchung) eine ganz bestimmte Aenderung der Gestalt oder des Volums entspricht und umgekehrt; vielmehr ist die Deformation außer der jeweiligen Belastung von den vorangegangenen Deformationszuständen und von dem zeitlichen Verlauf derselben abhängig. Wenn die Belastung aufgehoben wird, so ist ein

Teil der Deformation überhaupt nicht rückgängig, und auch der rückgängige Teil verschwindet nicht gleichzeitig mit der Belastung, vielmehr nimmt der Vorgang einen ganz bestimmten zeitlichen Verlauf, der von der Beschaffenheit des Körpers abhängt.[1]) Die Erscheinung, daß der Rückgang der Belastung nicht zu denselben Deformationszuständen führt, welche der Körper während der Belastung durchlaufen hat, d. h. daß der Vorgang nicht umkehrbar („reversibel") ist, nennt man elastische „Hysteresis", mit Rücksicht auf die analogen Erscheinungen der magnetischen Hysteresis bei Magnetisierung und Entmagnetisierung von ferromagnetischen Substanzen. Den verzögerten Rückgang der Deformation bezeichnet man als eine Folge der „elastischen Nachwirkung" oder auch der „Viskosität", der „inneren Reibung" des festen Körpers. Ueber die verschiedenen Auffassungen dieser Erscheinungen soll weiter unten näher berichtet werden.

In ähnlicher Weise sind die Vorgänge auch bei Flüssigkeiten und Gasen ziemlich verwickelt. Bei sogenannten „idealen Flüssigkeiten" setzt man voraus, daß eine Gestaltsänderung, die ohne Volumänderung vor sich geht, auf keinerlei Widerstand stößt (abgesehen natürlich von der Beschleunigung der trägen Massen), und deshalb keine Tendenz zum Rückgang der Deformation nach Aufheben der Kraftwirkung vorhanden ist. In Wirklichkeit ist aber stets ein, wenn auch zumeist geringer Widerstand gegen die Gestaltsänderung trotzdem zu beobachten. Der Unterschied zwischen dem Widerstand, den eine Flüssigkeit gegen Gestaltsänderung ausübt, und dem elastischen Widerstand des festen Körpers soll darin bestehen, daß der erstere bei sehr geringen Deformationsgeschwindigkeiten völlig verschwindet, während zur Gestaltänderung des festen Körpers bei noch so langsamer Deformation eine bestimmte Kraft notwendig ist. Die Entscheidung ist jedoch in Grenzfällen ziemlich schwer; es gibt in der Tat Stoffe, die man mit gleichem Rechte als feste Körper mit geringer Elastizität und beträchtlicher Nachwirkung oder als Flüssigkeiten mit sehr großer Zähigkeit auffassen kann.

In den folgenden Zeilen wollen wir uns vornehmlich mit festen Körpern beschäftigen. Ein Körper, bei dem jedem Belastungszustand ein bestimmter Deformationszustand entspricht, so daß dieser nur von der jeweiligen Belastung abhängt, kann als „idealer elastischer Körper" bezeichnet werden. Dieser bildet den Gegenstand der sogenannten mathematischen Elastizitätstheorie, die die Grundlage zu vielen physikalisch und technisch wichtigen Anwendungen liefert, da die ihr zugrundeliegende Voraussetzung für eine große Klasse von Körpern eine physikalisch recht brauchbare Annäherung darstellt. Nach Erledigung der völlig umkehrbaren elastischen Vorgänge wollen wir dann die verwickelteren Vorgänge der Hysteresis und der Nachwirkung betrachten und die diesbezüglichen Theorien wenigstens in ihren Grundzügen skizzieren.

Auf eine Beschränkung des Gegenstandes muß jedoch an dieser Stelle ausdrücklich hingewiesen werden: alle hier betrachteten Vorgänge beziehen sich auf kleine Deformationen der Körper, die den Zusammenhang der Teilchen nicht gefährden und auch keine wesentliche bleibende Aenderung hervorrufen. Der Fall beträchtlicher Deformationen, ferner die Frage nach den Bedingungen des Bruchs sollen im Artikel „Festigkeit" behandelt werden.

Eine weitere Beschränkung des Gegenstandes besteht darin, daß wir uns auf „isotrope" Körper beschränken wollen, d. h. auf solche, bei denen alle Richtungen gleichwertig sind. Bezüglich der Elastizitätsverhältnisse von Kristallen sei auf den Artikel über „Kristallphysik" verwiesen. Ebenso sei auf die in dem Artikel „Dielektrizität der Kristalle" behandelten Nachbargebiete hingewiesen, wo jene elastischen Deformationen zur Sprache kommen, die durch thermische oder elektrische Vorgänge bedingt sind.

I. Die Grundlagen der Elastizitätslehre.

1. Der Spannungszustand. Ein starrer Körper ist nach bekannten Grundsätzen im Gleichgewicht, falls die auf ihn einwirkenden äußeren Kräfte sich im Gleichgewicht halten. Um die Mechanik deformierbarer Körper diesem Grundsatze unterzuordnen, nimmt man an, daß bei diesen nicht nur die äußeren Kräfte unter sich im Gleichgewicht sein müssen, sondern die Gleichgewichtsbedingung für einen beliebig aus dem Körper herausgeschnittenen Teil erfüllt sein muß. Genauer gesagt: es muß stets die Möglichkeit da sein, eine Verteilung von inneren Druckkräften so zu treffen, daß die auf einen beliebig herausgeschnittenen Teil des Körpers einwirkenden Kräfte sich das Gleichgewicht halten. Ein Beispiel dafür ist die gleichmäßige und nach allen Richtungen gleiche Druckverteilung in einer ruhenden Flüssigkeit. Schneidet man in diesem Falle einen beliebigen

[1]) Wir denken dabei natürlich nicht an Schwingungen, die z. B. bei plötzlicher Entlastung entstehen. Die Beobachtungen zeigen daß eine einmal vorhanden gewesene Deformation noch lange nach Abklingen der Schwingungen „nachwirkt". Die Schwingungen sind durch die Trägheit der Massen bestimmt; dagegen ist für den zeitlichen Verlauf der Nachwirkungsdeformation die Trägheit ganz ohne Belang.

Digitized by Google

Teil heraus, so halten sich die allseitig gleichen Druckkräfte stets im Gleichgewicht. In derselben Weise denkt man sich auch bei einem elastischen Körper, welcher irgendwie durch äußere Kräfte beansprucht wird, innere Druckkräfte eingeführt. Schneidet man z. B. den Körper durch einen ebenen Schnitt AB in zwei Teile (s. Fig. 1), so sind die beiden Teile für sich zunächst nicht im

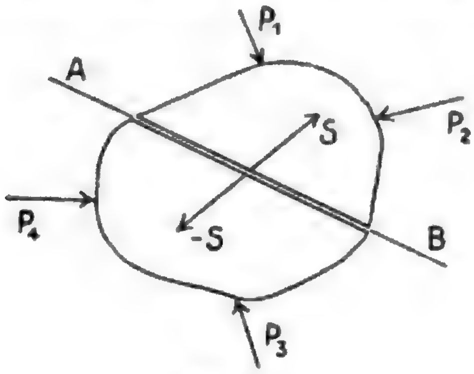


Fig. 1.

Gleichgewicht, vielmehr muß man an beiden Teilen je eine Kraft wirken lassen, die die Kräfte P_1 und P_2, bezw. P_3 und P_4 im Gleichgewicht hält. Die Resultierende von P_1 und P_2 ist jedoch gleich und entgegengesetzt gerichtet der Resultierenden von P_3 und P_4, da der Gesamtkörper im Gleichgewicht war; folglich werden die beiden Kräfte, die wir für Aufrechterhaltung des Gleichgewichtes an beiden Teilen einführen müssen, ebenfalls gleich und entgegengesetzt gerichtet sein (S und —S). Wir denken uns die Kräfte S und —S als Resultierenden von Oberflächenkräften, die auf die Schnittebene AB wirken. Der obere Halbkörper wird durch die äußeren Kräfte P_1 und P_2 gegen den unteren Halbkörper gedrückt und S repräsentiert den Gegendruck, den der letztere ausübt; ebenso wird der untere Halbkörper durch P_3 und P_4 gegen den oberen gedrückt, und der letztere übt den Gegendruck -S aus. Die Oberflächenkräfte, die die Kraft S (bezw. -S) liefern, sind im allgemeinen nicht gleichmäßig über die Schnittfläche AB verteilt; man bezieht sie daher auf die Flächeneinheit und nennt die auf die Flächeneinheit wirkende Kraft Spannung. Eine solche Spannung ist ein Vektor wie jede Kraft, und ihre Dimension ist Kraft/Fläche. Sie wird zumeist in praktischem System als kg/cm^2 oder g/mm^2 ausgedrückt. Der Spannungszustand in irgendeinem Punkte der Ebene AB ist aber offenbar durch den einzigen Schnitt AB durchaus nicht charakterisiert, weil ein Schnitt in einer anderen Richtung durch denselben Punkt andere innere Kräfte liefern wird. Denkt man sich alle möglichen Schnitte, die durch den Punkt gehen, so erhält man somit im allgemeinen für jeden Schnitt verschiedene Spannungen; man spricht daher stets von einer Spannung „in bezug auf eine Flächenrichtung". In jedem Punkte des Körpers entspricht jedem Flächenelement ein Spannungsvektor; dabei zählt eigentlich jedes Flächenelement doppelt, je nachdem es als Begrenzung der nach rechts oder links vom Schnitt liegenden Körperhälfte gedacht wird; zu beiden gehört offenbar derselbe Spannungsvektor mit entgegengesetztem Sinn. Die Gesamtheit der Vektoren, die zu allen möglichen Flächenelementen gehören, liefert den „Spannungszustand" in dem betreffenden Punkte.

Die Gesamtheit der Spannungen in einem Punkte kann durch Angabe der Spannungen in bezug auf drei aufeinander senkrechte Flächenelemente festgelegt werden. Bezeichnen wir den Spannungsvektor in bezug auf ein Flächenelement senkrecht zur x-Richtung mit S_x, die Spannungsvektoren in bezug auf je ein Flächenelement senkrecht zur y- bezw. z-Richtung mit S_y und S_z, so hat man zusammen neun Spannungskomponenten, die wir mit

X_x, Y_x, Z_x (Komponenten von S_x)
X_y, Y_y, Z_y („ „ S_y)
X_z, Y_z, Z_z („ „ S_z)

bezeichnen können (s. Fig. 2). Von diesen neun Komponenten stehen X_x, Y_y, Z_z offenbar senkrecht zu dem Flächenelement, zu

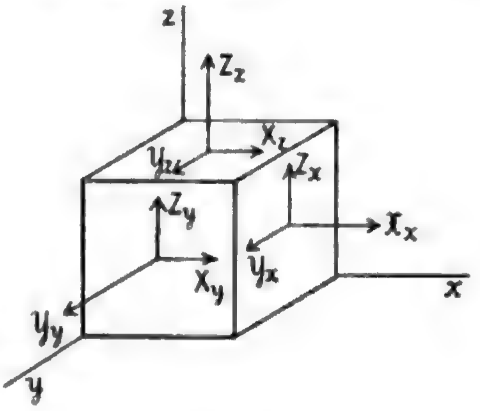


Fig. 2.

welchem sie gehören. Die übrigen fallen in die Fläche. Die ersteren werden als Normalspannungen, die letzteren als Tangentialspannungen (Schubspannungen) bezeichnet.[1]) Die Normalspannungen werden „Zugspannungen" genannt, falls der Spannungsvektor nach der „äußeren Seite" des Flächenelements zeigt, Druckspannungen, falls er nach „innen" gerichtet ist.

[1]) In der technischen Litteratur werden die Normalspannungen mit σ_x, σ_y, σ_z, die Schubspannungen mit τ_{xy}, τ_{yz} usw. bezeichnet.

Digitized by Google

Es ist zunächst leicht einzusehen, daß diese neun Spannungsgrößen sich auf sechs reduzieren, da die sechs Schubspannungen paarweise gleich sind. Es gelten nämlich die Beziehungen

$$X_y = Y_x$$
$$Y_z = Z_y$$
$$Z_x = X_z.$$

Dies kann man folgendermaßen einsehen: Da beliebige Teile des Körpers im Gleichgewicht sein müssen, so können wir dieses Prinzip auf einen Würfel von der Kantenänge $\Delta x = \Delta y = \Delta z$ anwenden (s. Fig. 3)

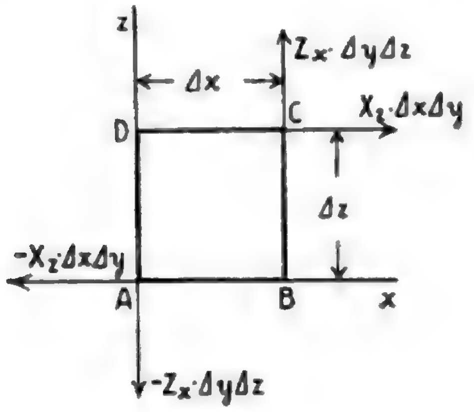


Fig. 3.

und die Bedingung ausdrücken, daß die Kräfte kein Drehmoment ausüben, das das Volumelement drehen würde. Wenn auch eine stetig verteilte äußere Kraft (z. B. Schwere) vorhanden ist, so kann sie doch kein merkliches Drehmoment ausüben, weil ihre Resultierende angenähert durch den Schwerpunkt des Würfels geht, und zwar um so genauer, je kleiner der Würfel ist. Ein merkliches Drehmoment kann also nur von den Spannungen herrühren. Rechnen wir z. B. das Drehmoment aus, welches um die y-Achse dreht, so kommen zwei Kräftepaare in Betracht, und zwar die Spannungen X_z an den Flächen $\Delta x \Delta y$ mit dem Hebelarm Δz und die Spannungen Z_x an den Flächen $\Delta y \Delta z$ mit dem Hebelarm Δx. Diese beiden Kräftepaare müssen im Gleichgewicht sein, woraus folgt

$$X_z . \Delta x \Delta y . \Delta z = Z_x . \Delta z \Delta y . \Delta x$$

oder

$$X_z = Z_x.$$

Ebenso folgt aus dem Gleichgewicht der Drehmomente um die x- und z-Achse die Gleichheit von Y_z und Z_y bezw. von X_y und Y_x. Die Schubspannungen, die sich „in einer Würfelkante treffen", sind also gleich.

Es fragt sich nun, ob die sechs Spannungskomponenten X_x, Y_y, Z_z, X_y, Y_z, Z_x den Spannungszustand in dem Punkte wirklich völlig festlegen. Wenn dies der Fall ist, so muß es möglich sein, die Spannung in bezug auf eine beliebige Ebene durch diese sechs Komponenten auszudrücken. Man kann nun in der Tat zeigen, daß dies immer möglich ist.

Zu diesem Zwecke betrachtet man ein Tetraeder mit den Kantenlängen Δx, Δy, Δz. (s. Figur 4). Ein solches Tetraeder muß offenbar ebenfalls im Gleichgewicht sein, wie jeder ausgeschnittene Teil des Körpers.

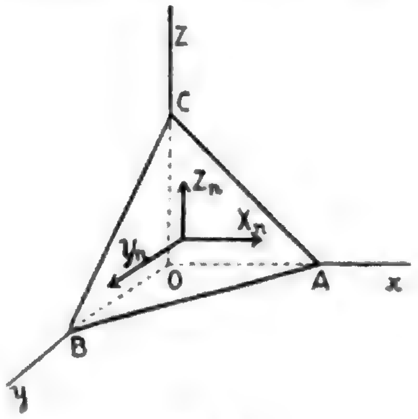


Fig. 4.

Die Kräfte in der x-Richtung rühren von den Spannungskomponenten X_x, X_y, X_z und von der x-Komponente X_n der unbekannten Spannung S_n in bezug auf die Fläche ABC her. Da die Flächen, auf die die drei erstgenannten Spannungen wirken, $\frac{1}{2} \Delta y \Delta z$, $\frac{1}{2} \Delta x \Delta z$, $\frac{1}{2} \Delta x \Delta y$ betragen, so liefern diese eine Kraft in der x-Richtung von der Größe

$$\tfrac{1}{2} (X_x \Delta y \Delta z + X_y \Delta x \Delta z + X_z \Delta z \Delta y).$$

Diese Kraft muß, wenn keine äußeren Kräfte wirken, der Kraft $X_n . \widehat{ABC}$ das Gleichgewicht halten. Da die drei Seitenflächen als Projektionen der Fläche ABC auf die Koordinatenebenen entstehen, so gelten die Relationen:

$$\tfrac{1}{2} \Delta y \Delta z = \widehat{ABC} \cos \alpha$$
$$\tfrac{1}{2} \Delta z \Delta x = \widehat{ABC} \cos \beta$$
$$\tfrac{1}{2} \Delta x \Delta y = \widehat{ABC} \cos \gamma$$

wobei α, β, γ die Richtungskosinusse der Normalen des Flächenelements $\widehat{ABC}$ bezeichnen. Man hat daher

$$X_x \cos \alpha + X_y \cos \beta + X_z \cos \gamma = X_n.$$

In ähnlicher Weise erhält man Relationen für Y_n und Z_n. Diese Relationen müssen nun bestehen bleiben, wie klein auch Δx, Δy, Δz gewählt werden, d. h. auch wenn man mit der Ebene ABC ganz nahe an den Punkt 0 rückt. Man sieht aber, daß die Relation dann auch für den Fall gilt, daß beliebige äußere Kräfte wirken, da das Volumen und damit alle „räumlich verteilten Kräfte" klein von der dritten Ordnung werden: die äußere Kraft wird bei Verkleinerung des Tetraeders immer kleiner, während die Spannungen endlich bleiben. Rückt man mit ABC ganz zum Punkte 0 heran, so gehen X_n, Y_n, Z_n in die Spannungen im Punkte 0 in bezug

auf die Flächenrichtung ABC über, und damit sind die drei Komponenten der Spannung in bezug auf eine beliebige Ebene in der Tat durch die sechs Spannungskomponenten ausgedrückt.

Der Spannungszustand in einem Punkte kann durch folgende Darstellung geometrisch veranschaulicht werden. Man kann eine Fläche zweiten Grades (eine sog. Spannungsfläche) in der Weise konstruieren, daß jede Ebene mit dem zugehörigen Spannungsvektor ein Paar konjugierter Elemente bildet, d. h. wenn wir die Richtung des Spannungsvektors als Fahrstrahl auffassen, so ist die zugehörige Ebene parallel der Tangentialebene an die Spannungsfläche am Endpunkte des Fahrstrahls. Die Größe des Spannungsvektors kann man an dieser Darstellung ebenfalls ablesen: ihre Normalkomponente ist gleich dem Quadrat der Entfernung der Tangentialebene von dem Mittelpunkt der Fläche, wodurch die Größe des Spannungsvektors selbst, da seine Richtung bereits bekannt ist, ebenfalls bestimmt wird.

Der allseitig gleichen Druckverteilung (z. B. in ruhender Flüssigkeit) entspricht als Spannungsfläche offenbar eine Kugel. Bei diesem Spannungszustande steht die Spannung stets senkrecht zu dem zugehörigen Flächenelement. Man sieht aber unmittelbar ein, daß dies nur in diesem einzigen Falle zutrifft. Im allgemeinen werden wir stets drei Ebenen finden, die die Eigenschaft haben, daß die Spannung auf der Ebene senkrecht steht, so daß in diesen Ebenen keine Schubspannungen auftreten. Diese Ebenen sind die sogenannten „Hauptebenen“, die zugehörigen Spannungen, die offenbar in die Richtung der Hauptachsen der Spannungsfläche fallen und dem Quadrate derselben gleich sind, nennt man „Hauptspannungen“. Unter den drei Hauptspannungen sind die größte und die kleinste Spannung in dem betreffenden Punkte enthalten, bezw. die größte positive und die größte negative Spannung.

2. Der Deformationszustand. Man kennt den Deformationszustand eines kontinuierlichen Mediums vollständig, falls man für jedes vor der Deformation aus dem Körper herausgegriffene Linienelement Richtung und Länge nach der Deformation angeben kann (s. Fig. 5). Betrachten wir z. B. ein Parallelepiped mit den Kantenlängen Δx, Δy, Δz, so ist der Deformationszustand desselben bekannt, falls wir die neuen Lagen der Linienelemente und ihre neuen Längen angeben können. In der Elastizitätslehre nimmt man nun an, daß auf den Spannungszustand nur die sogenannte „reine Deformation“, d. h. die Längenänderungen und die relativen Winkeländerungen der in dem Punkte zusammenlaufenden Linienelemente von Einfluß sein können. In dieser Annahme ist Zweifaches ausgedrückt:

a) Man macht die Voraussetzung, daß eine Translation oder Drehung des Volumelements

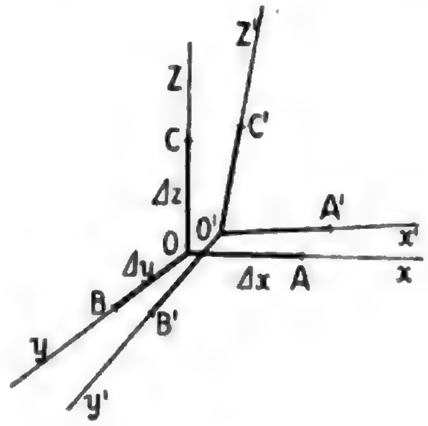


Fig. 5.

keine Spannungen hervorrufen kann. Dies wird dadurch plausibel, daß sonst eine reine Drehung oder Translation des Gesamtkörpers ebenfalls elastische Spannungen hervorrufen würde, was der Erfahrung offenbar widerspricht.

b) Man stellt sich dadurch, daß man für die Spannungen nur die Dehnungen und Winkeländerungen des in dem betreffenden Punkte zusammenlaufenden Achsenkreuzes als maßgebend ansieht, auf den Standpunkt der „Nahewirkungstheorie“. Der Einfluß der weiteren Umgebung wird vernachlässigt. Diese Auffassung bildet zwar heutzutage die Grundlage unserer Mechanik der Kontinua, von dem Standpunkte der Molekulartheorie aus ist sie aber nur als eine erste Näherung zu betrachten.

Die sechs Deformationsgrößen, die wir zu betrachten haben, sind also die drei Längenänderungen (Dehnungen) der Linienelemente: ε_x, ε_y, ε_z und die drei Winkeländerungen der drei Achsen: γ_{xy}, γ_{yz}, γ_{xz}. Man erhält reine Dehnungen, wenn man annimmt, daß das Parallelepiped ein solches bleibt und nur die Kantenlängen verändert werden. Andererseits erhält man den Fall reinen Schubs, falls wir alle Kantenlängen behalten und das Parallelepiped in ein Rhomboeder überführen. Aehnlicherweise wie durch die sechs Spannungskomponenten die Spannung in bezug auf eine beliebige Flächenrichtung festgelegt ist, so kann man aus den Dehnungen und Winkeländerungen eines einzigen Achsenkreuzes die Dehnung eines beliebig gerichteten Linienelementes und die Winkeländerung zwischen zwei beliebigen Linienelementen berechnen.

Digitized by Google

Man findet in Analogie zu den drei Hauptebenen, in denen die Schubspannungen verschwinden, drei aufeinander senkrechte Linienelemente, die nur eine Dehnung und keine Winkeländerung erfahren. Dies kann man am einfachsten folgendermaßen veranschaulichen: Schneiden wir eine Kugel aus dem Körper heraus, so wird diese bei der Deformation annähernd in ein Ellipsoid übergehen; alsdann bilden die drei Hauptachsen ein Achsenkreuz, welches vor und nach der Deformation aus drei aufeinander senkrechten Linienelementen besteht. Die Dehnungen dieser Linienelemente nennt man „Hauptdehnungen". Diese enthalten die größte und kleinste Dehnung, die irgendein durch den betreffenden Punkt gezogenes Linienelement erfahren kann (bezw. größte positive und größte negative Dehnung). Offenbar kann man den Deformationszustand statt durch Angabe der sechs Dehnungskomponenten in bezug auf ein beliebiges Achsenkreuz auch dadurch festlegen, daß man die Größe und Orientierung der drei Hauptdehnungen angibt und dadurch das Ellipsoid festlegt, in welches die Kugel übergegangen ist.

Unter Dehnung verstehen wir die spezifische Längenänderung, d. h. die Längenänderung der Längeneinheit; und zwar soll Verlängerung positiv, Verkürzung negativ gerechnet werden. Sowohl die Dehnungen als die Winkeländerungen sind dimensionslose Zahlen; sie lassen sich berechnen, sobald die Verschiebungen der einzelnen Punkte bekannt sind.

Betrachten wir das Achsenkreuz X, Y, Z im Punkte 0 (s. Figur 6) und bezeichnen wir die

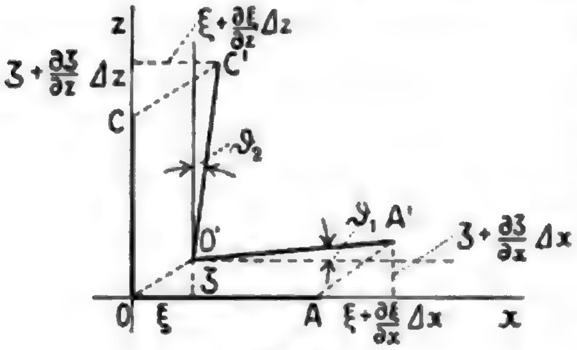


Fig. 6.

Verschiebung des Punktes 0 mit ξ, η, ζ, wobei diese Größen als abhängig von den Koordinaten des Punktes x, y, z zu betrachten sind, so werden die Endpunkte der drei Linienelemente offenbar etwas veränderte Verschiebungen erfahren und zwar

$$\text{A:}\quad \xi + \frac{\partial \xi}{dx}\Delta x,\quad \eta + \frac{\partial \eta}{\partial x}\Delta x,\quad \zeta + \frac{\partial \zeta}{\partial x}\Delta x$$

$$\text{B:}\quad \xi + \frac{\partial \xi}{\partial y}\Delta y,\quad \eta + \frac{\partial \eta}{\partial y}\Delta y,\quad \zeta + \frac{\partial \zeta}{\partial y}\Delta y$$

$$\text{C:}\quad \xi + \frac{\partial \xi}{\partial z}\Delta z,\quad \eta + \frac{\partial \eta}{\partial z}\Delta z,\quad \zeta + \frac{\partial \zeta}{\partial z}\Delta z$$

Die Länge Δx geht daher angenähert in

$$\left(\Delta x + \xi + \frac{\partial \xi}{\partial x}\Delta x\right) - \xi$$

über, so daß die spezifische Längenänderung

$$\varepsilon_x = \frac{\frac{\partial \xi}{\partial x}\Delta x}{\Delta x} = \frac{\partial \xi}{\partial x}$$

beträgt. Ebenso ist die Dehnung nach der y- z-Richtung $\frac{\partial \eta}{\partial y}$ und $\frac{\partial \zeta}{\partial z}$. Was die Winkeländerungen anbelangt, so kann man diese auch durch Differentialquotienten der Verschiebungen ausdrücken. So besteht die Winkeländerung zwischen der x- und z-Achse aus der Summe der beiden Winkel

$$\vartheta_1 = \frac{\frac{\partial \zeta}{\partial x}\Delta x}{\Delta x},\quad \vartheta_2 = \frac{\frac{\partial \xi}{\partial z}\Delta y}{\Delta y}$$

so daß die Winkeländerungen durch die Formeln

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\partial \xi}{\partial y}$$

$$\gamma_{yz} = \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{\partial \eta}{\partial z}$$

$$\gamma_{zx} = \frac{\partial \xi}{dz} + \frac{\partial z}{\partial x}$$

ausgedrückt werden.

Die sechs Formänderungskomponenten setzen sich also aus den Ableitungen der drei Verschiebungen ξ, η, ζ linear zusammen. Daraus folgt, daß man nicht beliebige Größen als Formänderungskomponenten annehmen kann, sondern diese müssen gewissen Bedingungen genügen, die es ausdrücken, daß sie eben von drei Funktionen ξ, η, ζ in der angegebenen Weise hergeleitet werden können. Man nennt diese Bedingungen „Kompatibilitätsbedingungen".

3. Beziehungen zwischen Spannungen und Deformationsgrößen. Das Hookesche Gesetz. Wie wir in der Einleitung auseinandergesetzt haben, ist für einen idealen elastischen Körper der Spannungszustand durch den jeweiligen Deformationszustand völlig bestimmt und umgekehrt, d. h. die sechs Spannungskomponenten und die sechs Deformationsgrößen müssen miteinander durch eindeutige funktionale Beziehungen verknüpft sein. Die mathematische Elastizitätstheorie nimmt für die meisten Untersuchungen speziell eine Proportionalität zwischen Spannungsgrößen und Deformationsgrößen an. Für eine große Klasse von Körpern liefert dies in der Tat eine recht gute Annäherung. Die Proportionalität zwischen Kraftwirkung und Deformation hat zuerst in allgemeiner Weise Robert Hooke (1676) ausgesprochen in der berühmten Aussage: „ut tensio, sic vis". Man nennt daher den präzisen Ansatz, der erst viel später, nach der durch Navier, Cauchy und Poisson erfolgten Analyse des Spannungs- und Deformationszustandes aufgestellt werden konnte,

Digitized by Google

das verallgemeinerte Hookesche Gesetz. Die Proportionalitätsfaktoren nennt man im allgemeinen Elastizitätskonstanten. Ihre Anzahl ist bei dem allgemeinsten anisotropen Körper (bei einem Kristall des triklinischen Systems) 21, für isotrope Körper, d. h. für Stoffe, bei welchen sämtliche Richtungen gleichwertig sind, kann ihre Anzahl nicht größer sein, als 2. Zwischen diesen Grenzen liegen die verschiedenen Kristallsysteme mit ihren verschiedenen Symmetrieeigenschaften.

Bei isotropen Körpern ist es zunächst einzusehen, daß ein Parallelepiped durch Normalspannungen keine Winkeländerung erfahren kann. Denken wir z. B. einen Würfel durch zwei Normalkräfte auf Zug beansprucht, so können diese offenbar keinen Schub zur Folge haben, weil eine Druckspannung von derselben Größe den entgegengesetzten Schub bewirken würde, und dies der Gleichwertigkeit aller Richtungen widerspricht: es ist gar nicht einzusehen, warum die Zugspannung einen Schub gerade nach links, die Druckspannung nach rechts hervorrufen sollte, oder umgekehrt. Man kann sich in dieser Weise überzeugen, daß bei einem isotropen Körper die Normalspannungen nur Dehnungen und die Schubspannungen nur Winkeländerungen hervorrufen können (Hauptdehnungen und Hauptspannungen fallen also der Richtung nach zusammen). Berücksichtigt man noch, daß eine x-Kraft auf die Dehnung in der y- und auf die in der z-Richtung denselben Einfluß haben muß, so gelangt man zu dem allgemeinen Ansatze

$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= \alpha(X_x - \nu(Y_y + Z_z))\\ \varepsilon_y &= \alpha(Y_y - \nu(X_x + Z_z))\\ \varepsilon_z &= \alpha(Z_z - \nu(X_x + Y_y))\\ \gamma_{xy} &= \beta\, X_y\\ \gamma_{yz} &= \beta\, Y_z\\ \gamma_{zx} &= \beta\, Z_x\end{aligned}$$

Man nennt α den „Dehnungskoeffizienten", β den „Schiebungskoeffizienten". ν ist die sogenannte Poissonsche Verhältniszahl; sie bestimmt nach dem Ansatz das Verhältnis der Dehnungen, welche eine Zugspannung in der Querrichtung und in der Längsrichtung hervorruft.

Man kann außerdem zeigen, daß zwischen den drei Konstanten eine universelle Relation bestehen muß, so daß die Anzahl der unabhängigen Elastizitätskoeffizienten sich auf 2 reduziert. Betrachten wir z. B. (Fig. 7) einen Würfel von der Kantenlänge 1, der in der x-Richtung auf Zug beansprucht wird, so sind die drei Dehnungen

$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= \alpha\, X_x\\ \varepsilon_y &= -\alpha\nu X_x\\ \varepsilon_z &= -\alpha\nu X_x\end{aligned}$$

d. h. der Würfel von der Kantenlänge Eins erfährt eine Verlängerung um αX_x in der Längsrichtung und die ν-fache Verkürzung in den beiden Querrichtungen. Wir wollen nun einen Schnitt AB durch die Diagonalfläche durchlegen und die Spannungen und Dehnungen auf das Achsenkreuz Ξ, Z beziehen (s. Figur 7a). In der Fläche AB tritt eine

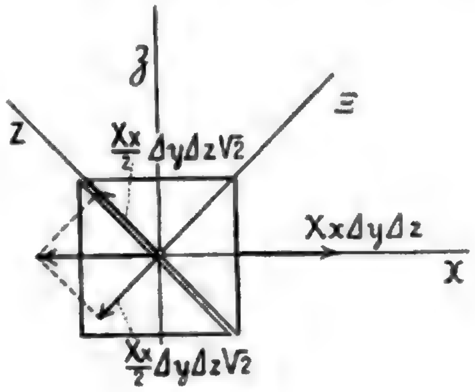


Fig. 7a.

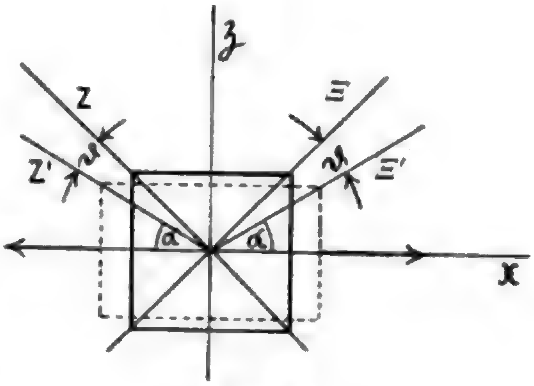


Fig. 7b.

Normalspannung und eine Schubspannung auf, die mit der Spannung X_x im Gleichgewicht sein müssen, da die Gleichgewichtsbedingung für beide Körperhälften erfüllt sein muß. Daraus folgt, daß Normalspannung und Zugspannung, die auf eine Fläche von der Größe $\Delta y \Delta z \sqrt{2}$ wirken, den Betrag $\frac{X_x}{2}$ haben müssen. Was die Formänderung anbelangt so erfahren die beiden Achsen Ξ, Z eine Winkeländerung, die proportional ist der Schubspannung, d. h. es muß gelten (s. Figur 7b)

$$2\vartheta = \beta\,\frac{X_x}{2}.$$

Andererseits kann man die Winkeländerung geometrisch aus den Längenänderungen in der x- und y-Richtung berechnen. Man erhält

$$2\vartheta = 2\left(45^\circ - \operatorname{arctg}\frac{1 - \frac{\varepsilon_z}{2}}{1 + \frac{\varepsilon_x}{2}}\right)$$

Digitized by Google

oder angenähert

$$2\vartheta = \varepsilon_x - \varepsilon_z$$

Daraus folgt unmittelbar die Beziehung

$$X_x \alpha(1+\nu) = \frac{\beta X_x}{2}$$

oder

$$\alpha = \frac{\beta}{2(1+\nu)}$$

In der mathematischen und technischen Literatur werden im allgemeinen verschiedene Elastizitätskonstanten eingeführt, die natürlich gegenseitig ausgedrückt werden können. Diese Elastizitätskonstanten können in einfachen Fällen leicht gedeutet werden, was in dem nächsten Abschnitt gezeigt werden soll.

4. Deutung der Elastizitätskonstanten.

4a) Lamésche Konstanten. In der mathematischen Elastizitätslehre benutzt man zumeist die Laméschen Ausdrücke, die die Spannungen als Funktionen der Formänderungsgrößen angeben.[1] Die Relationen lauten:

$$X_x = \lambda(\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z) + 2\mu\varepsilon_x$$
$$Y_y = \lambda(\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z) + 2\mu\varepsilon_y$$
$$Z_z = \lambda(\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z) + 2\mu\varepsilon_z$$
$$X_y = \mu\gamma_{xy}$$
$$Y_z = \mu\gamma_{yz}$$
$$Z_x = \mu\gamma_{zx}$$

Die beiden Konstanten können mittels unserer vorigen Konstanten durch die Beziehungen

$$\lambda = \frac{1}{\alpha}\,\frac{\nu}{1-\nu-2\nu^2}$$

$$\mu = \frac{1}{\beta}$$

ausgedrückt werden. Ein Vorteil der Laméschen Bezeichnungsweise besteht darin, daß man gewissermaßen Volumelastizität und Gestaltselastizität trennt. Ist nämlich $\mu = 0$, so sind sämtliche Normalspannungen gleich, die Schubspannungen $= 0$, so daß man einen allseitig gleichen Druckzustand vor sich hat, wie in einer idealen Flüssigkeit. Da die Summe der drei Dehnungen angenähert gleich der Volumänderung des Volumelementes ist, so drückt λ in diesem Falle das Verhältnis des Druckes zu der Volumänderung aus.

4b) Elastizitätsmodul und Gleitmodul. In der technischen Praxis spezialisiert man die Elastizitätskonstanten dadurch, daß man den Fall des reinen Zug- und Druckversuchs und den Fall des reinen Schubs (reine Winkeländerung) betrachtet. Für eine Zugbeanspruchung in der x-Richtung (s. Fig. 8) ist die entsprechende Dehnung $\varepsilon_x = \alpha X_x$; den reziproken Wert von α bezeichnet man als Elastizitätsmodul (Dehnungsmodul), $E = \frac{1}{\alpha}$. Die englischen Autoren nennen diese Größe den Youngschen Modul, da Young (1807) als erster den Begriff präzisierte. Für eine reine Schubbeanspruchung (s. Fig. 9) hat man zwischen Schubspannung und Winkeländerung die Beziehung $\gamma_{xz} = \beta X_z$; der reziproke Wert des Schiebungskoeffizienten β heißt der Gleitmodul, $G = \frac{1}{\beta}\ (= \mu)$.

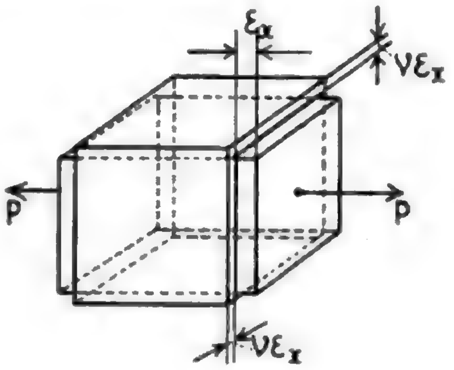


Fig. 8.

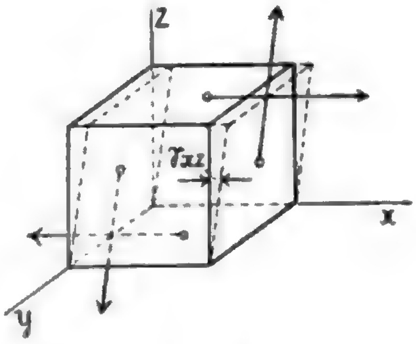


Fig. 9.

4c) Kompressionsmodul. Für einen allseitig gleichen Druckzustand erhält man aus den obigen Gleichungen wegen Gleichheit der drei Normalspannungen bezw. der drei Dehnungen die Beziehung

$$X_x = Y_y = Z_z = (\lambda + \frac{2}{3}\mu)(\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z) =$$
$$(\lambda + \frac{2}{3}\mu).3\varepsilon.$$

Bezeichnet man den allseitigen Druck mit p und die spezifische Volumänderung mit

$$\frac{\Delta v}{v} = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z = 3\varepsilon,$$

[1]) Die mathematische Elastizitätstheorie benutzt für die Formänderungskomponenten zumeist folgende Bezeichnungen: x_x, y_y, z_z für die Dehnungen, x_y, y_z, z_x für Winkeländerungen.

Digitized by Google

so wird [1])

$$p = \left(\lambda + \frac{2}{3}\mu\right)\frac{\Delta v}{v};$$

der Faktor $\lambda + \frac{2}{3}\mu$ heißt der Kompressibilitätsmodul K, der reziproke Wert desselben die Kompressibilität k.

Der Kompressibilitätsmodul wird durch Elastizitätsmodul und Poissonsche Zahl in der Form $K = \frac{1}{3}\frac{E}{1-2\nu}$ ausgedrückt. Man folgert daraus, daß die Poissonsche Verhältniszahl stets zwischen den Grenzen 0 und 0,5 liegt. Wäre nämlich $\nu > 0{,}5$, so würde K negativ ausfallen, d. h. der Körper würde bei Zug sich zusammenziehen, bei Druck sich ausdehnen, was der Erfahrung widerspricht.

5. Die Ziele der mathematischen Elastizitätstheorie. Durch Festsetzung der Beziehungen zwischen Deformationsgrößen und Spannungen ist die Möglichkeit gegeben, für vorgeschriebene Belastungsverhältnisse die Deformation eines elastischen Körpers zu berechnen. Diese ist vollständig bekannt, falls wir die Verschiebungen ξ, η, ζ als Funktionen des Ortes angeben. Es fragt sich nun, wie diese bestimmt werden. Die einzige Bedingung, die wir zu erfüllen haben, ist die Gleichgewichtsbedingung für ein beliebiges Volumelement. Genauer gesagt: durch die Verschiebungen sind die Deformationsgrößen gegeben, durch die Deformationsgrößen die Spannungen und nun müssen die von den Verschiebungen in dieser Weise abgeleiteten Spannungen für einen beliebigen Teil des Körpers sich im Gleichgewicht befinden. Da die Deformationsgrößen sich linear aus den Ableitungen der Verschiebungen ξ, η, ζ zusammensetzen, die Spannungen laut des Hookeschen Gesetzes lineare Funktionen der Deformationsgrößen sind, so erhalten wir als Gleichgewichtsbedingungen drei lineare Differentialgleichungen für die drei Funktionen ξ, η, ζ, die diese mit Hilfe der zugehörigen Randbedingungen völlig bestimmen. Bezüglich der Randbedingungen sind zwei Hauptfälle zu unterscheiden: Zumeist sind entweder die Verschiebungen an der Begrenzung des Körpers (z. B. Stab mit festgehaltenen Enden) oder aber die Oberflächenkräfte (z. B. ein Körper unter Flüssigkeitsdruck) gegeben. In dem letzteren Falle müssen die Spannungen, falls wir uns der Begrenzung nähern, in die vorgeschriebenen Oberflächendrucke übergehen. In beiden Fällen reichen die Randbedingungen gerade aus, die Verteilung der Deformationen und Spannungen zu bestimmen.

Man erhält die Gleichgewichtsbedingungen an dem Volumelement, falls man die Differenzen der Spannungen an gegenüberliegenden Seitenflächen vergleicht. Die Spannungskomponenten, die eine Kraft nach der x-Richtung liefern, sind X_x, X_y, X_z. Der Ueberschuß dieser Spannungen an den Flächen nach der wachsenden x-, y- und z-Richtung beträgt offenbar

$$\frac{\partial X_x}{\partial x}\Delta x,\quad \frac{\partial X_y}{\partial y}\Delta y,\quad \frac{\partial X_z}{\partial z}\Delta z;$$

der Ueberschuß an Kraft für das ganze Volumelement ist daher (wobei wir mit den betreffenden Flächen multiplizieren)

$$\left(\frac{\partial X_x}{\partial x} + \frac{\partial X_y}{\partial y} + \frac{\partial X_z}{\partial z}\right)\Delta x \Delta y \Delta z.$$

Diese Kraft muß, falls keine räumlich verteilte äußere Kraft vorhanden ist, verschwinden, bei Vorhandensein einer solchen von der Größe X, Y, Z pro Volumeinheit der Kraft $X\,\Delta x\,\Delta y\,\Delta z$ das Gleichgewicht halten.

Es folgt daraus:

$$\frac{\partial X_x}{\partial x} + \frac{\partial X_y}{\partial y} + \frac{\partial X_z}{\partial z} + X = 0$$

und entsprechend

$$\frac{\partial Y_x}{\partial x} + \frac{\partial Y_y}{\partial y} + \frac{\partial Y_z}{\partial z} + Y = 0$$

$$\frac{\partial Z_x}{\partial x} + \frac{\partial Z_y}{\partial y} + \frac{\partial Z_z}{\partial z} + Z = 0.$$

Im Falle der Bewegung sind die rechten Seiten durch die Ausdrücke

$$\varrho\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2},\quad \varrho\frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2},\quad \varrho\frac{\partial^2 \zeta}{\partial t^2}$$

zu ersetzen, wobei ϱ die Masse der Volumeinheit (Dichte),

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial t},\quad \frac{\partial^2 \eta}{\partial t},\quad \frac{\partial^2 \zeta}{\partial t^2}$$

die Komponenten der Beschleunigung in dem betreffenden Punkte bezeichnen.

Führt man in diese drei Gleichungen das Hookesche Gesetz für die Spannungen, ferner in das Hookesche Gesetz die Ausdrücke für die Formänderungsgrößen ein, so erhält man drei lineare Differentialgleichungen zweiter Ordnung für ξ, η, ζ. Man bezeichnet sie als „Grundgleichungen der Elastizitätstheorie".

Durch die Lösung der Grundgleichungen erhält man allerdings die Spannungen nur in dem Falle richtig, wenn der Körper spannungslos ist, solange keine äußeren Kräfte auf ihn wirken. Dies ist aber oft nicht zutreffend. Man kann z. B. einen geschlossenen Metallring aufschneiden, einen Sektor aus ihm herausschneiden, und die beiden Enden wieder zusammenlöten: der so gewonnene Körper ist offenbar auch ohne Einwirkung von irgendwelchen äußeren Kräften in einem bestimmten Spannungszustande. Es sind „Anfangsspannun-

[1]) Die Volumänderung eines Würfels von der Kantenlänge a beträgt offenbar, falls jede Kante die Dehnung ε erfährt $\Delta v = a^3(1+\varepsilon)^3 - a^3$, oder angenähert $\Delta v = 3a^3\varepsilon$, woraus $\frac{\Delta v}{v} = 3\varepsilon$ folgt.

Digitized by Google

gen" vorhanden. Wird der Körper belastet, so gibt die Lösung der elastischen Grundgleichungen nur die „zusätzlichen" Spannungen. Ebenso werden bei Metallkörpern, die aus der Schmelze durch rasche Abkühlung fest geworden sind, stets innere Spannungen vorhanden sein, denen man sehr schwer Rechnung tragen kann. Man kann die inneren Spannungen dadurch konstatieren, daß, falls man einen solchen Körper zerschneidet, die beiden Teile im allgemeinen nicht mehr zueinander passen.

6. Formänderungsarbeit. Minimalprinzipe. Man kann die Bestimmung des elastischen Gleichgewichts auf ein allgemeines energetisches Prinzip zurückführen, wenn man die Arbeit, die bei der elastischen Deformation eines Körpers geleistet wird, als eine Art potentieller Energie des Körpers auffaßt. Diese Arbeitsmenge repräsentiert infolge der Reversibilität der Deformation in der Tat eine in dem Körper aufgespeicherte Arbeitsfähigkeit, die man als Deformationsenergie (Formänderungsenergie) bezeichnet. Betrachtet man nun den elastischen Körper und die angreifenden äußeren Kräfte als ein abgeschlossenes System, so ist das Gleichgewicht offenbar durch das Minimum der potentiellen Energie des Gesamtsystems bestimmt. Die Deformation erfolgt in der Weise, daß die Formänderungsenergie des elastischen Körpers, vermindert um die Arbeitsfähigkeit, die die Kräfte durch Verschiebung ihrer Angriffspunkte einbüßen, möglichst klein ausfällt. Daß die Arbeitsleistung der äußeren Kräfte bei Verschiebung ihrer Angriffspunkte als Verminderung der potentiellen Energie des Gesamtsystems anzusehen ist, erkennt man am einfachsten, falls man als äußere Kräfte Gewichte anbringt. Wird z. B. ein Stab durch ein Gewicht gebogen, so ist die Durchsenkung des Gewichtes offenbar eine Verminderung der potentiellen Energie desselben, da es vom höheren Niveau zu einem niedrigeren gesunken ist. Die bei der Biegung geleistete Formänderungsarbeit gilt dagegen als Zunahme der potentiellen Energie, da dadurch eine Arbeitsfähigkeit im Körper aufgespeichert wurde: wird die Belastung langsam aufgehoben, so ist der Körper in der Tat imstande, eine gewisse Arbeit zu leisten. Nach unserem Prinzip wird das Gewicht den Stab nur soweit durchbiegen, bis die Zunahme der Formänderungsarbeit stärker wird als die Abnahme der potentiellen Energie durch das Sinken des Gewichtes.[1])

Man kann zeigen, daß für einen isotropen Körper, für den das Hookesche Gesetz gilt, die bei der Deformation geleistete Arbeit pro Volumeinheit (Energiedichte)

$$W = \frac{1}{2}(X_x \varepsilon_x + Y_y \varepsilon_y + Z_z \varepsilon_z + X_y \gamma_{xy} + Y_z \gamma_{yz} + Z_x \gamma_{zx})$$

beträgt. Man nennt diesen Ausdruck auch elastisches Potential, mit Rücksicht darauf, daß die Spannungen als Ableitungen dieser Größe nach den Deformationsgrößen sich darstellen lassen.

Das Prinzip vom Minimum der potentiellen Energie ist vielfach benutzt worden, für spezielle Fälle einfache Rechnungsverfahren herzuleiten. Besondere Beachtung verdient die Anwendung des Prinzipes in den Fällen, wo mehrere Gleichgewichtsgestalten möglich sind und es um die Entscheidung sich handelt, welche dieser Gleichgewichtsgestalten stabil ist. Die stabile Gleichgewichtskonfiguration muß nach bekannten Grundsätzen die kleinste potentielle Energie besitzen (vgl. II, 5).

II. Elastizität von Stäben und Fäden.

Die in den vorliegenden Nummern präzisierte mathematische Aufgabe kann nur in einzelnen einfachen Fällen in exakter Weise gelöst werden, so daß man sich zumeist mit angenäherten Lösungen begnügt. Einfache Lösungen erhält man insbesondere für solche Körper, bei denen eine oder mehrere Dimensionen klein sind gegen die anderen, wie z. B. für dünne Platten und insbesondere für dünne Stäbe. Diesen Fällen kommt von zwei Gesichtspunkten aus eine besondere Bedeutung zu. Einerseits sind an Bauwerken oder Maschinen zumeist gerade jene Konstruktionsteile der Bruchgefahr am meisten ausgesetzt, die als solche Stäbe oder Platten betrachtet werden können, so daß diese Annäherungslösungen für die technische Festigkeitslehre fast vollkommen ausreichen (vgl. den Artikel „Festigkeit"). Andererseits

[1]) Man wäre zunächst geneigt zu glauben, daß die beiden Arbeitsmengen stets gleich sind, da der Stab doch durch die äußere Kraft deformiert wurde. Es ist indessen zu beachten, daß der Stab als potentielle (Formänderungs-) Energie nur jene Arbeit aufnimmt, die geleistet wird, falls der Stab durch sukzessiv wachsende Gewichte belastet wird, d. h. falls die Belastung bei jeder Durchbiegung so viel beträgt, wie nach dem Hookeschen Gesetz gerade ausreicht, die Deformation hervorzurufen. Dies äußert sich darin, daß ein plötzlich durch das volle Gewicht belasteter Stab in Schwingungen gerät. Man kann leicht nachrechnen, daß im Gleichgewichtszustande die Formänderungsenergie des Stabes nicht gleich Gewicht × Weg ist, sondern genau die Hälfte dieser Größe.

Digitized by Google

seits eignen sich besonders Stäbe am besten zu physikalischen Messungen, weil sie bei mäßigen Kräften verhältnismäßig größere Deformationen liefern als Körper von gedrängter Gestalt. Wählt man insbesondere einfache Anordnungen, wie Zug, Druck, Verdrehung oder Biegung zylindrischer Stäbe, so ist man in der Lage, auf Grund der erwähnten angenäherten Lösungen der Elastizitätsgleichungen die Verhältnisse vollkommen zu übersehen und die Gültigkeit der Grundgesetze zu prüfen, sowie die Werte der Elastizitätskonstanten zu bestimmen.

Von besonderer Wichtigkeit ist die elastische Deformation von Stäben und Platten außerdem für die Akustik (vgl. den Artikel „Klang").

Der einfachste Fall eines Stabes ist ein gerader Zylinder von konstantem Querschnitt. Die Achse des Zylinders die durch den Schwerpunkt des Querschnittes gehen soll, heißt die Zentrallinie. Eine Erweiterung des Begriffes ist der Stab mit „veränderlichem Querschnitt". Ein „gekrümmter Stab" hat eine krumme Linie als Zentrallinie; als Querschnitte gelten die Schnitte senkrecht zu dieser Linie. Bei einer Platte oder einem Rohr spricht man von Zentralfläche. Die dazu senkrechte Abmessung heißt die Plattendicke. Es sei schließlich bemerkt, daß ein Stab mit sehr geringer Biegungssteifigkeit ein Faden, eine Platte mit geringer Biegungssteifigkeit Membran genannt wird.

1. Zug und Druck gerader Stäbe (Fäden). Wird ein zylindrischer Stab, dessen Achse in die x-Richtung fallen soll und dessen Querschnitt F beträgt, durch die axiale Kraft P gezogen oder gedrückt, so entsteht eine Zug- oder Druckspannung von der Größe

$$X_x = \frac{P}{F}.$$

Dabei ist angenommen, daß die Spannung sich auf den Querschnitt gleichmäßig verteilt; in einiger Entfernung von den Einspannstellen ist dies tatsächlich der Fall. Die spezifische Dehnung beträgt $\varepsilon_x = \frac{X_x}{E}$ und demnach die Längenänderung Δl einer Strecke von der Länge l

$$\Delta l = \frac{Pl}{FE}$$

Die Längenänderung ist also proportional der Zugkraft und der Länge, umgekehrt proportional dem Querschnitt und dem Elastizitätsmodul.

Wie schon öfters erwähnt wurde, ist der Zug im allgemeinen von einer Verminderung des Querschnittes, der Druck von einer Vergrößerung desselben begleitet. Die spezifische Längenänderung in der Querrichtung beträgt

$$\varepsilon_y = \varepsilon_z = \nu\varepsilon_x = \frac{\nu P}{FE},$$

somit die Verminderung des Querschnittes angenähert

$$\frac{\Delta F}{F} = \varepsilon_y + \varepsilon_z = 2\nu\frac{P}{FE}.$$

Sowohl die Messung der Dehnung als der Querkontraktion können zur Bestimmung der Elastizitätskonstanten herangezogen werden. Die Methoden zur Messung der Dehnung sind bis zu einer großen Genauigkeit getrieben worden. Längenänderungen bis etwa 0,02 mm kann man mit Hilfe eines Kathetometers durch direkte Ablesung messen; durch mechanische oder optische Uebersetzung (Spiegelmethode) kann man die Genauigkeit bis zu Ablesungen von etwa 0,0005 mm steigern. Für die genauesten Messungen empfiehlt sich die Interferenzmethode. Bei diesem Verfahren werden durch Reflexion an zwei Glasplatten, die mit zwei verschiedenen Querschnitten des Stabes verbunden sind, Interferenzstreifen erzeugt. Aus der Verschiebung der Interferenzstreifen kann auf die gegenseitige Annäherung oder Entfernung der Querschnitte schließen. Mit dieser Methode hat man Längenänderungen bis zu 30 $\mu\mu$ nachgewiesen.

Die Messung der Querdehnung verlangt große Genauigkeit, da die Verschiebungen sehr klein sind. Die Interferenzmethode ist auch hier mit Erfolg angewendet worden, dagegen sind die direkten Messungen mit Fühlhebel und Spiegelablesung wenig genau. Bei praktischen Messungen bestimmt man die Poissonsche Verhältniszahl ν nicht direkt durch Beobachtung der Querdehnung, sondern man berechnet sie aus Elastizitäts- und Gleitmodul, wobei der letztere zumeist durch Torsionsversuche bestimmt wird (s. unten 3).

2. Biegung gerader Stäbe. Bei gleichförmiger Biegung eines geraden Stabes kann man den Grundgleichungen der Elastizität streng genügen, wenn man annimmt, daß von allen Spannungskomponenten nur die Zug- oder Druckspannung in der Achsenrichtung von Null verschieden ist. Für diesen Fall ergibt sich eine Deformation des Stabes, bei der jeder ebene Querschnitt eben bleibt. Wir beschränken uns auf die Biegung in einer Ebene. Die Stabachse falle mit der x-Achse zusammen, und der Stab sei in der x-z-Ebene gebogen (s. Fig. 10). Wir nehmen außerdem an, daß der Querschnitt in bezug auf die z-Achse symmetrisch sei. Da alle Spannungskomponenten bis auf eine verschwinden, steht diese mit der zugehörigen Dehnung in derselben Beziehung wie bei einem einfachem Zug- oder Druckversuch:

$$X_x = E\varepsilon_x.$$

Andererseits wird die Dehnung in einfacher

Digitized by Google

Weise durch den Krümmungsradius ausgedrückt, den die Zentrallinie des gebogenen Stabes annimmt. Die äußeren Fasern werden offenbar gezogen, die dem Krümmungsmittelpunkte zugewendeten gedrückt. Es gibt also eine Schicht, die keine Dehnung erfährt; sie heißt die „neutrale Schicht". Wird der Krümmungsradius einer Faser in der neutralen Schicht mit R bezeichnet und

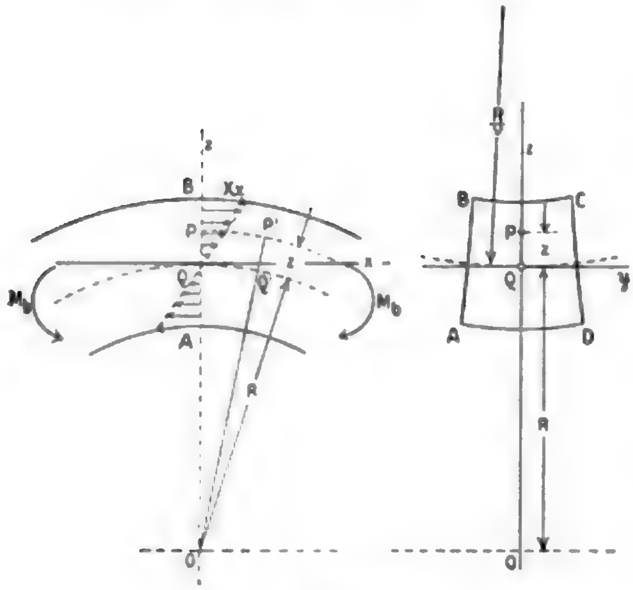


Fig. 10.

die Verlängerung einer beliebigen Faser von der Länge l in der Entfernung z von der neutralen Schicht mit Δl, so besteht die Relation

$$\frac{P'Q'}{PQ} = \frac{l + \Delta l}{l} = \frac{R + z}{R}.$$

Die spezifische Dehnung wird daher

$$\varepsilon_x = \frac{\Delta l}{l} = \frac{z}{R}.$$

Man erhält daraus für die Spannung den Ausdruck

$$X_x = \frac{Ez}{R}.$$

Wenn wir den Stab durch den Schnitt ABCD in zwei Teile zerlegt denken, so müssen offenbar beide Teile im Gleichgewicht sein, d. h. die Spannungen X_x müssen den äußeren Kräften, die z. B. links vom Querschnitt angreifen, das Gleichgewicht halten. Bei gleichförmiger Biegung durch zwei entgegengesetzte Momente haben wir keine resultierende Kraft, nur das Moment M_b. Man hat daher Gleichgewicht, falls die Resultierende der Spannungen verschwindet und ihr resultierendes Moment gleich M_b wird:

$$\iint X_x dydz = 0$$

$$\iint X_x dydz \, . \, z = M_b.$$

Setzt man den Wert

$$X_x = \frac{z}{R} E$$

ein, so liefert die erste Gleichung offenbar die Bedingung, daß die neutrale Schicht durch den Schwerpunkt geht. Die Zentrallinie bleibt also ungedehnt. Die zweite Gleichung liefert eine Beziehung zwischen dem Biegungsmoment und der Krümmung 1/R

$$M_b = \frac{1}{R} E . \iint z^2 dydz.$$

Das Integral $\iint z^2 dydz$ gibt die Summe aller Flächenelemente, multipliziert mit dem Quadrat der Entfernung von der y-Achse. Diese Achse heißt die „neutrale Achse" oder „Schwerpunktsachse". Die erwähnte Summe wird als Trägheitsmoment J des Querschnittes in bezug auf diese Achse bezeichnet. Man hat daher als Grundgleichung der Biegung

$$M_b = \frac{JE}{R},$$

d. h. die Krümmung ist proportional dem Biegungsmoment und umgekehrt proportional dem Trägheitsmoment des Querschnittes und dem Elastizitätsmodul. Das Produkt JE wird auch „Biegungssteifigkeit" genannt.

Die soeben abgeleitete einfache Beziehung gilt in allen Fällen, in denen das Biegungsmoment um eine sogenannte Hauptträgheitsachse des Querschnittes wirkt. Zieht man beliebige Gerade durch den Schwerpunkt und vergleicht die zugehörigen Trägheitsmomente, so gibt es zwei aufeinander senkrechte Richtungen, die das größte und kleinste Trägheitsmoment liefern. Diese Geraden heißen die Hauptträgheitsachsen. Solange das Biegungsmoment um eine Hauptträgheitsachse wirkt, wird der Stab in der dazu senkrechten Ebene gebogen und die obige Beziehung ist stichhaltig. Wirkt aber das Biegungsmoment um eine andere Achse, so ist die Ebene der gekrümmten Zentrallinie im allgemeinen verschieden von der Ebene des Biegungsmoments.

Die obige, zunächst nur für die gleichförmige Biegung durch zwei Biegungsmomente gewonnene Gleichung wird in der Biegungstheorie auch für veränderliche Biegungsmomente angewendet, wobei also das Biegungsmoment als eine Funktion von x aufgefaßt werden muß. Setzt man die Durchbiegung allgemein = f(x), so wird die Krümmung angenähert $\frac{1}{R} = -\frac{d^2f}{dx^2}$, und man erhält als Gleichung der „elastischen Linie"

$$\frac{d^2f}{dx^2} = -M_b(x).$$

Diese Gleichung liefert die Grundlage zu der Theorie der sogenannten „Träger“, die in der Technik eine große Rolle spielen.

In der Praxis wird die Biegung zumeist durch Einzelkräfte oder durch stetig verteilte Belastung ausgeübt. Die elastische Linie wird außer der Art der Belastung beeinflußt durch die Anordnung und die Art der Unterstützung. Man sagt, der Stab sei frei gestützt (vgl. Figur 11 oben), wenn nur die Durchbiegung gehindert wird, aber die Richtung der elastischen Linie in dem betreffenden Punkte nicht bestimmt ist, er sei dagegen eingeklemmt (vgl. Figur 11 unten), sobald Durchbiegung und Richtung

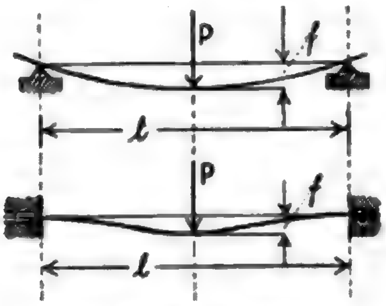


Fig. 11.

der Tangente festgelegt sind. Für physikalische Messungen kommt hauptsächlich der Wert der größten Durchbiegung (Biegungspfeil) in Betracht. Man erhält für die einfachsten Anordnungen nachfolgende Werte:

an einem Ende eingeklemmt, am anderen Ende durch die Kraft P belastet:

$$f = \frac{1}{3}\frac{Pl^3}{JE};$$

an beiden Enden frei gelagert, in der Mitte belastet:

$$f = \frac{1}{48}\frac{Pl^3}{JE};$$

an beiden Enden eingeklemmt, in der Mitte belastet:

$$f = \frac{1}{192}\frac{Pl^3}{JE}.$$

Biegungsversuche eignen sich unmittelbar zur Bestimmung des Elastizitätsmoduls. Man mißt z. B. den Biegungspfeil und die zugehörige Kraft. Die Messung der Deformation geschieht zumeist mittels Spiegelablesung; da bei ähnlichen Querschnittsabmessungen und mäßigen Kräften beim Biegungsversuch größere Verschiebungen vorkommen, als beim Zugversuch, so bietet der Biegungsversuch ein bequemeres Mittel zur Bestimmung des Elastizitätsmoduls.

Eine sehr bequeme und genaue Methode hat W. Voigt angewendet, indem er die Belastung durch eine schwingende Scheibe mit großem Trägheitsmoment ersetzte. Der Stab wird an einem Ende fest eingeklemmt, am anderen Ende mit einer ausbalanzierten drehbaren Scheibe verbunden. Ist die Verdrehung der Scheibe gleich ϑ, das Trägheitsmoment derselben um die Drehachse gleich D, so lautet die Bewegungsgleichung der Scheibe

$$D\frac{d^2\vartheta}{dt^2} = M.$$

Das Drehmoment M wird in diesem Falle dadurch ausgeübt, daß der Stab der Biegung einen elastischen Widerstand entgegensetzt; dieser ist gleich und entgegengesetzt gerichtet dem Biegungsmoment, welches dem Stab die gleiche Biegung erteilen würde. Da die Verdrehung der Stabenden gleich ist der Verdrehung der Scheibe, so beträgt die Krümmung (l die Länge des Stabes) $\frac{1}{R} = \frac{\vartheta}{l}$. Das Biegungsmoment ist daher

$$M_b = \frac{JE}{l}\vartheta = -M.$$

Hieraus folgt die Gleichung

$$D\frac{d^2\vartheta}{dt^2} + \frac{JE}{l}\vartheta = 0$$

Die Lösung lautet:

$$\vartheta = A\sin\left(\sqrt{\frac{JE}{Dl}}\,t\right).$$

Die Schwingungsdauer beträgt daher

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{JE}{Dl}};$$

durch Messung dieser Zeitdauer kann der Elastizitätsmodul bestimmt werden. Vorteile der Methode sind zunächst eine theoretisch einwandfreie Anordnung, da die Biegung streng durch Momente ausgeübt wird, ferner große Genauigkeit, da man durch Vergrößerung des Trägheitsmoments der Scheibe die Schwingungszeit beliebig vergrößern kann.

Man kann durch den Biegungsversuch die Poissonsche Verhältniszahl auch ermitteln, sobald man die Verzerrung des Querschnittes berücksichtigt. Bei der Biegung kontrahieren sich die gezogenen Fasern in der Querrichtung, die gedrückten dehnen sich aus. Daraus folgt, daß der Querschnitt nicht unverändert bleiben kann; er erleidet eine Verbiegung in der eigenen Ebene und zwar beträgt die entstehende Krümmung (vgl. Fig. 10), wie man sich leicht überzeugen kann, $\frac{\nu}{R}$ falls $\frac{1}{R}$ die Krümmung der Stabachse bedeutet. Bei einem viereckigen Stab geht also die Oberfläche in eine Sattelfläche über mit den Hauptkrümmungen $\frac{1}{R}$ und $\frac{\nu}{R}$. Bei einem durchsichtigen Material (z. B. bei Biegung von ebenen Glasplatten) kann man nun diese Formänderung der Fläche beobachten

mit Hilfe der Interferenzlinien, indem man das an der deformierten und an einer ebenen Fläche reflektierte Licht interferieren läßt. Die Interferenzstreifen bilden eine Hyperbelschar, deren Asymptoten einen Winkel β miteinander einschließen, welcher mit dem Verhältnis der beiden Hauptkrümmungen, d. h. mit der Verhältniszahl ν in der Beziehung

$$\mathrm{tg}^2\beta = \nu$$

steht.

3. **Torsion gerader Stäbe.** Während bei der Biegung nur die zum Querschnitt senkrechte Spannungskomponente von Null verschieden ist, kommt es bei der gleichmäßigen Verdrehung gerader Stäbe auf die Schubspannungen im Querschnitt an. Eine einfache Lösung für die Spannungsverteilung kann man jedoch nur bei solchen Querschnitten angeben, die durch einen Kreis oder durch mehrere konzentrische Kreise begrenzt sind (Kreisstab, kreisförmiges Rohr). In diesem Falle steht die Schubspannung in jedem Punkte senkrecht zum Radius. Man erhält offenbar keine resultierende Kraft, sondern nur ein Drehmoment um die Stabachse von der Größe (R Halbmesser des Querschnittes, τ die Schubspannung)

$$M_t = \int_0^R 2\pi r^2 \tau dr.$$

Andererseits muß die Schubspannung proportional der Winkeländerung sein, die ein Volumelement erfährt. Man setzt daher

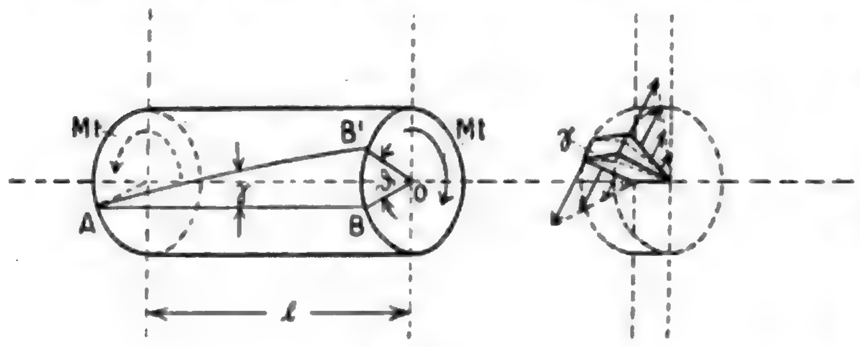


Fig. 12.

$$\tau = G\gamma$$

Die Winkeländerung γ ist die Schiebung eines Volumelementes durch die Verdrehung zweier benachbarter Querschnitte (s. Fig. 12). Jede Erzeugende der Zylinderfläche geht in eine Schraubenlinie über. Denken wir uns eine solche Schraubenlinie in der Entfernung r von der Stabachse, und wird die Verdrehung zweier Querschnitte, die in der Entfernung l voneinander liegen, mit ϑ bezeichnet, so ist die Winkeländerung

$$\gamma = \frac{r\vartheta}{l}$$

Man erhält also für die Schubspannung den Ausdruck

$$\tau = G\frac{r\vartheta}{l}$$

und für das Drehmoment

$$M_t = \frac{G\vartheta}{l}\int_0^R 2\pi r^3 dr$$

Das Integral heißt das polare Trägheitsmoment J_p des Querschnittes: es ist gleich der Summe aller Flächenelemente multipliziert mit dem Quadrat der Entfernung von der Stabachse.

Das Drehmoment M_t muß Gleichgewicht halten mit dem Drehmoment der äußeren Kräfte, d. h. die durch das Torsionsmoment M_t erzeugte Verdrehung des Stabes von der Länge l beträgt

$$\vartheta = \frac{M_t l}{J_p G}.$$

Die Verdrehung ist proportional dem Drehmoment, der Meßlänge und umgekehrt proportional dem Gleitmodul und dem polaren Trägheitsmoment des Querschnittes.

Für einen beliebigen Querschnitt gilt diese Relation nicht mehr, wie dies zuerst von St. Venant nachgewiesen wurde; allerdings besteht der Unterschied nur darin, daß das polare Trägheitsmoment durch eine andere Größe ersetzt wird, die ebenfalls nur von der Querschnittsform und den Querschnittsabmessungen abhängt. Das Produkt dieser Querschnittsgröße und des Gleitmoduls nennt man Torsionssteifigkeit (C). Dann gilt allgemein für die Verdrehung

$$\vartheta = \frac{M_t l}{C}$$

Im Falle eines beliebigen Querschnittes kann man die Spannungsverteilung nach Prandtl in folgender Weise veranschaulichen: Man denke sich eine biegsame Membran über den betreffenden Querschnitt ausgespannt und durch konstanten Flüssigkeitsdruck durchgebogen. Die Gestalt der Membran liefert die sogenannte „Spannungsfläche“ für die Torsion des Querschnittes. Diese Fläche hat die Eigenschaft, daß ihre Linien gleicher Höhe in jedem Punkte die Richtung, ihr Gefälle senkrecht zu diesen Niveaulinien den Betrag der Schubspannung in dem betreffenden Punkte angeben. Sind die Ordinaten der Spannungsfläche so bestimmt, daß das Gefälle numerisch gleich der Schubspannung ist, so wird der Flächeninhalt zwischen dem ebenen Querschnitt und der Spannungsfläche numerisch gleich dem Torsionsmoment. Mathematisch läuft es auf die Lösung

Digitized by Google

folgenden Problems aus: die Ordinate der Spannungsfläche Z genügt der Gleichung:

$$\frac{\partial^2 Z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 Z}{\partial z^2} = \text{konst.}$$

Man muß jene Lösung dieser partiellen Differentialgleichung bestimmen, für die am Rande des betreffenden Querschnittes Z = 0 ist.

Die Analogie des Torsionsproblems mit der Durchbiegung einer ebenen Membran kann man dazu benutzen, um die Spannungsverteilung bei komplizierten Querschnitten experimentell festzustellen, indem man etwa über einen Rahmen von der Form des betreffenden Querschnittes eine Seifenhaut aufspannt und diese durch gleichmäßigen Luftdruck aufbläst. Durch Messung der Durchbiegung kann man die Spannungsfläche und daraus die Spannungsverteilung bestimmen.

Die Deformation bei einem beliebigen Querschnitt ist insofern verschieden von der Deformation des kreisförmigen Stabes, daß im allgemeinen die ebenen Querschnitte nicht eben bleiben, sondern eine Wölbung annehmen. Bei viereckigem Querschnitt sind vier Quadrate vorhanden, die abwechselnd nach entgegengesetzten Richtungen gewölbt werden (s. Fig. 13).

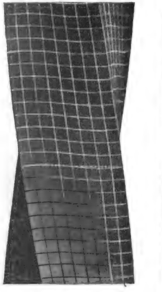


Fig. 13.

Der Torsionsversuch kann zur unmittelbaren Bestimmung des Gleitmoduls G dienen. Nach der sogenannten statischen Methode mißt man die Verdrehung zweier Querschnitte in einer bestimmten Entfernung bei gegebenem Drehmoment. Genauere Resultate erhält man durch Schwingungsbeobachtungen, indem man als Belastung wieder die Trägheitskraft einer Scheibe benützt, die mit dem freien Ende eines in diesem Falle vertikal aufgehängten Stabes starr verbunden ist. Die Bewegungsgleichung der Scheibe lautet (D Trägheitsmoment um die Drehachse, M Drehmoment)

$$D \frac{d^2\vartheta}{dt^2} = M.$$

Bezeichnen wir die jeweilige Verdrehung des unteren Stabendes mit ϑ, so ist das Drehmoment, welches der deformierte Stab — den wir kreisförmig annehmen — auf die Scheibe ausübt,

$$M_t = \frac{GJ_p}{l} \vartheta = -M,$$

so daß die Schwingungsgleichung lautet:

$$D \frac{d^2\vartheta}{dt^2} + \frac{GJ_p}{l} \vartheta = 0$$

Entsprechend der Lösung

$$\vartheta = A \sin \sqrt{\frac{GJ_p}{Dl}}\, t$$

erhält man folgenden Ausdruck für die Schwingungsdauer

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{Dl}{GJ_p}}.$$

Es wird T beobachtet und daraus G berechnet. Bei Stäben mit anderen Querschnitten wird J_p durch eine entsprechende bekannte Querschnittsgröße ersetzt.

4. Experimentelle Resultate über Elastizitätskonstanten. 4a) Elastizitäts- und Gleitmodul. Wie es bereits dargestellt wurde, kann der Elastizitätsmodul unmittelbar durch Zug-, Druck- und Biegungsversuche, der Gleitmodul durch Torsionsversuche bestimmt werden. Man kann auch Biegung und Torsion gleichzeitig anwenden, so daß man beide Konstanten an demselben Probestab gleichzeitig bestimmt (Kirchhoff). Sind die Deformationen klein, so superponiert sich Biegung und Drillung, ohne sich gegenseitig zu beeinflussen.

Ueber die Größenverhältnisse der beiden Elastizitätskonstanten für einige wichtigeren Stoffe soll nachstehende Zahlentafel Auskunft geben, wobei die Stoffe nach abnehmendem Elastizitätsmodul geordnet sind.

Digitized by Google

Stoff	E kg/cm²	G kg/cm²	Stoff	E kg/cm²	G kg/cm²
Iridium	5 250 000	—	Quarzfäden	520 000—620 000	146 000—290 000
Korund	5 200 000	—	Zinn	410 000—540 000	153 000—173 000
Topas	2 900 000	—	Marmor	260 000	—
Beryll	2 300 000	—	Granit	245 000	—
Flußeisen,			Blei	150 000—180 000	550 000—814 000
Stahl	2 050 000—2 200 000	740 000—820 000	Akazienholz	127 000	—
Platin	1 550 000—1 720 000	658 000—663 000	Sandstein	63 000	—
Gußeisen	1 170 000—1 280 000	—	Pappel	52 000	—
Kupfer	1 050 000—1 250 000	400 000—480 000	Eis	24 000—67 000	—
Zink	873 000—1 050 000	380 000—390 000	Paraffin	17 000	5700
Gold	760 000— 980 000	250 000—285 000	Wachs	5 000	—
Silber	700 000— 780 000	247 000—296 000	Kautschuk	8—12	—
Gläser	470 000— 820 000	184 000—329 000			

Bemerkungen: Die Elastizitätsmoduln der Kristalle, die in der Tabelle vorkommen, beziehen sich auf den isotropen (sogenannten dichten) Zustand. Bei Metallen hängt der Modul sehr stark von der vorangegangenen Bearbeitung der Probestäbe ab (gezogen, gehämmert, gegossen, gewalzt usw.); es sind deshalb Grenzwerte angegeben. Für die Gesteine (Marmor, Granit) sind die technischen Messungen berücksichtigt worden; neuerer Zeit sind in Japan an Gesteinen sehr viele Elastizitätsmessungen zu seismischen Zwecken gemacht worden, die jedoch eine Schwankung der Werte innerhalb sehr weiter Grenzen zeigen. Bezüglich der Hölzer bilden Akazienholz und Pappel Grenzfälle; die angegebenen Zahlen sind Elastizitätsmoduln für Zug in der Faserrichtung; die Moduln in tangentialer und radialer Richtung sind viel kleiner. Bei Kautschuk gilt der angegebene Wert für kleinere Dehnungen; wird er sehr stark gedehnt (etwa bis auf das 3 bis 4fache der ursprünglichen Länge), so wächst der Modul bis zu einem Betrage von 30000 kg/cm².

4b) Poissonsche Verhältniszahl. Die Poissonsche Verhältniszahl (Verhältnis der Quer- und der Längsdehnung) kann entweder unmittelbar durch Zug- und Druckversuch, ferner durch Beobachtung der Querbiegung beim Biegungsversuch gemessen oder aber aus dem Verhältnis $\frac{E}{G}$ mittels der Formel

$$1 + \nu = \frac{E}{2G}$$

berechnet werden. Die direkt gemessenen Werte stehen mit den berechneten zwar nicht immer in bester Uebereinstimmung, doch liegen die Abweichungen innerhalb der Grenzen der Unsicherheit der Beobachtungen, die infolge Ungleichheit des Materials oft ganz erheblich sind.

4c) Abweichungen vom Hookeschen Gesetz. Die Bestimmung der Elastizitätskonstanten wird durch die Tatsache erschwert, daß eine elastische Formänderung stets von einer, wenn auch oft sehr geringen bleibenden Aenderung begleitet wird. Wenn man aber auch diesen Dehnungsrest durch mehrmalige Wiederholung des Versuches

Mittlere Werte für die Poissonsche Zahl.

Stoff	σ	Stoff	σ
Kork	0,00	Eisen, Stahl	0,29
Opal	0,06	Kupfer	0,34
Platin	0,21	Bronze	0,36
Elektrolyt.		Blei	0,42
Kupfer	0,25	Kautschuk	0,49
Gläser	0,26	Paraffin	0,50

eliminiert, so zeigen die genaueren Untersuchungen, daß auch die rein elastischen Formänderungen dem Hookeschen Gesetze (Proportionalität zwischen Spannung und Dehnung) nur angenähert gehorchen. Beträchtlich sind die Abweichungen z. B. bei Gußeisen, wie dies bereits vor Jahrzehnten festgestellt wurde, ferner bei vielen Gesteinen und bei den technisch wichtigen hydraulischen Bindemitteln (Zement, Beton). Im allgemeinen nimmt die Dehnung stärker zu als die Spannung; bei einigen Gesteinen, z. B. bei Marmor, hat man jedoch zunächst eine stärkere Zunahme der Spannung, während bei größerer Belastung wieder die Dehnung stärker zunimmt. Bei Kautschuk ist es gerade umgekehrt.

Betrachtet man das Hookesche Gesetz nur als erste Annäherung, so wird man die Beziehung zwischen Spannung und Dehnung allgemein durch eine funktionelle Beziehung $\sigma = f(\varepsilon)$ angeben. Der Differentialquotient $\frac{d\sigma}{d\varepsilon}$ kann dann als ein von der Größe der jeweiligen Dehnung bezw. Spannung abhängiger Elastizitätsmodul betrachtet werden.

Die diesbezüglichen Untersuchungen beziehen sich zumeist auf die Aenderung des Elsatizitätsmoduls; über die Aenderung des Gleitmoduls sind nur wenig Beobachtungen vorhanden.

Um die größeren Abweichungen bei Gußeisen und bei Gesteinen für die praktischen Rechnungen zu berücksichtigen, hat C. Bach als allgemeine Interpolations-

Digitized by Google

formel für elastische Formänderungen die Gleichung (ε Dehnung, σ Spannung)

$$\varepsilon = \alpha\sigma^m$$

vorgeschlagen; für $m = 1$ ergibt sich als Spezialfall das Hookesche Gesetz. Diese Interpolationsformel hat aber den Nachteil, daß sie für kleine Dehnungen die Spannungs-Dehnungsbeziehung nicht richtig darstellen kann, da für $\varepsilon = \sigma = 0$ der Differentialquotient $\frac{d\sigma}{d\varepsilon}$ gleich Null oder unendlich wird, je nachdem der Exponent $m \lessgtr 1$ ist. Dies würde also eine ganz rasche oder ganz langsame Zunahme der Dehnungen bei kleinen Kräften bedeuten, während gerade für sehr kleine Kräfte das Hookesche Gesetz bestehen soll, wie dies F. Kohlrausch und E. Grüneisen durch sehr genaue Messungen nachgewiesen haben. Man wird also Formeln bevorzugen, die für sehr kleine Werte von ε und σ in die einfache lineare Formel übergehen.[1])

4d) Beziehungen zur Molekulartheorie. Es ist schon ziemlich früh versucht worden, die Elastizitätskonstanten mit den für den molekularen Aufbau der Körper charakteristischen Größen in Beziehung zu setzen; es ist jedoch in dieser Hinsicht eigentlich recht wenig erreicht worden. Die Elastizitätstheorie, wie sie im Kapitel I geschildert wurde, behandelt den festen Körper als Kontinuum. Nun kann man dieselben Gleichungen auch auf Grund der Annahme ableiten, daß der Körper aus Molekülen (oder Atomen) aufgebaut ist, zwischen denen irgendwelche Kräfte wirken, die die Teilchen in stabiler Anordnung halten. Allerdings wissen wir über diese Kräfte zunächst recht wenig. Würde man annehmen, daß die Kräfte nur von der Entfernung abhängen, so müßten die Elastizitätskonstanten irgendwie durch die Abstände der Moleküle bestimmt sein. Wertheim fand, daß für alle Metalle der Elastizitätsmodul umgekehrt proportional ist der 7. Potenz des mittleren Atomabstandes, den man aus Atomgewicht und Dichte ermitteln kann. Voigt fand eine bessere Uebereinstimmung mit der 6. Potenz (so daß Elastizitätskonstanten multipliziert mit dem Quadrate des Atomvolums eine universelle Konstante ergeben würden). Die Uebereinstimmung ist nicht besonders gut, doch auch dieses mangelhafte Resultat zeigt wenigstens so viel, daß zwischen den Atomen Kräfte wirken müssen, die von den Massen derselben wenig abhängig sind, da diese bei den verglichenen Metallen zwischen außerordentlich weiten Grenzen schwanken.

Nimmt man an, daß zwischen den Molekülen nur Zentralkräfte wirken, so kann man nachweisen, daß ein isotroper Körper nur eine unabhängige Elastizitätskonstante besitzen kann. Würde die Annahme zutreffen, so müßte zwischen den beiden Konstanten E und G eine universelle Beziehung bestehen, entsprechend einem Werte der Poissonschen Konstante $\nu = \frac{1}{4}$ für alle isotropen Substanzen. Diese Beziehung trifft aber nicht zu, vielmehr variiert ν zwischen 0 und $\frac{1}{2}$. Der Widerspruch wurde von W. Voigt durch die Bemerkung beseitigt, daß die meisten isotropen Körper (Metalle, Gesteine usw.) eigentlich aus kristallinischen Bausteinen bestehen, die an und für sich anisotrop sind, aber nach allen Richtungen gleichmäßig verteilt sind, so daß sie ein isotropes Konglomerat bilden. Voigt hat für ein solches Gebilde die mittleren Elastizitätskonstanten berechnet und gezeigt, daß für ein solches Konglomerat die erwähnte universelle Beziehung nicht mehr bestehen muß.

4e) Temperaturabhängigkeit der Elastizitätskonstanten. Ueber die Temperaturabhängigkeit der Elastizitätskonstanten sind zahlreiche Messungen angestellt worden. Man findet bei den meisten Substanzen eine Abnahme mit wachsender Temperatur sowohl für den Elastizitätsmodul als für den Gleitmodul. Im allgemeinen nimmt aber der Elastizitätsmodul wesentlich stärker ab, so daß die Poissonsche Verhältniszahl, die mit den beiden durch die Relation $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$ verbunden ist, zunimmt. Es ist sehr wahrscheinlich, daß ν in der Nähe des Schmelzpunktes, oder, falls die Substanzen in einen weichen Zustand übergehen, nahezu $\frac{1}{2}$ wird (z. B. bei Kautschuk); alsdann ist der Kompressibilitätsmodul $K = \frac{E}{3(1-2\sigma)}$ ungleichmäßig größer als sowohl der Dehnungs- wie der Gleitmodul. Die Substanzen setzen in diesem Zustande der Volumänderung einen viel größeren Widerstand entgegen, als der Gestaltsänderung, wie dies in der Nähe des Ueberganges in den flüssigen Zustand auch zu erwarten ist.

Was die Größe des Temperaturkoeffizienten, d. h. der prozentuellen Abnahme für 1° Temperaturerhöhung anbelangt, so fand Cl. Schäfer (1901), daß dieser lediglich von dem Abstande vom Schmelzpunkt abhängt. So ist bei Zimmertemperatur der

[1]) Eine vollständige Zusammenstellung der Dehnungs-Spannungsformeln findet man bei Mehmke, Z. f. Math. u. Physik 1897.

Digitized by Google

Temperaturkoeffizient bei Metallen im allgemeinen desto größer, je höher der Schmelzpunkt des betreffenden Metalls liegt. Allerdings kommen die verschiedensten Ausnahmen von dieser allgemeinen Regel vor. Interessant ist das Verhalten von einigen Legierungen: Bei Nickelstahl nimmt der Elastizitätsmodul mit der Temperatur ab, wenn der Nickelgehalt kleiner als 17 % oder größer als 44 % ist. Zwischen diesen Grenzen nimmt der Elastizitätsmodul mit der Temperatur zu, so daß es zwei Zusammensetzungen gibt, bei denen der Elastizitätsmodul von der Temperatur praktisch unabhängig ist (beachtenswert ist ein analoges Verhalten bezüglich der magnetischen Eigenschaften). Ebenso gibt es bei antimonhaltigen Gläsern eine bestimmte Zusammensetzung, deren Temperaturkoeffizient gleich Null ist.

Für niedrige Temperaturen hat man die Aenderung der Elastizitätskonstanten bis zum Siedepunkt der flüssigen Luft verfolgt. In diesem Intervall findet man eine ungefähr lineare Zunahme mit sinkender Temperatur. Bei —185° hat z. B. Stahl einen um etwa 8,7 %, Kupfer um 18 % größeren Elastizitätsmodul als bei Zimmertemperatur.

Es sei noch bemerkt, daß die Temperaturabhängigkeit der Elastizitätskonstanten auf Grund thermodynamischer Ueberlegungen berechnet werden kann aus der thermischen Ausdehnung und der Abkühlung bei adiabatischer Deformation. Dies liefert eine Methode zur Bestimmung des Temperaturkoeffizienten des Elastizitätsmoduls.

5. Elastische Stabilität. Solange die Deformationen eines Stabes klein sind gegen die Abmessungen desselben, gibt es stets nur eine Gestalt, die bei bestimmten äußeren Kräften eine Gleichgewichtslage darstellt. Bei sogenannten „endlichen Deformationen", d. h. bei Formänderungen, die vergleichbar sind, wenn auch nicht mit der Länge, aber wenigstens mit den Querschnittsabmessungen des Stabes, kann es vorkommen, daß ein in ganz bestimmter Weise belasteter Stab mehrere verschiedene Gleichgewichtslagen annehmen kann. Man denke sich z. B. einen vertikal gestellten, am unteren Ende eingeklemmten Stab, der am oberen Ende ein Gewicht G trägt (Fig. 14). Unter Umständen ist es möglich, eine gebogene Gestalt zu finden, die der Gleichgewichtsbedingung — Drehmoment proportional der Krümmung — ebenfalls genügt, so wie dies bei dem aufrechten geraden Stabe (Biegungsmoment = 0, Krümmung = 0) offenbar der Fall ist. Welche dieser beiden Konfigurationen stabil ist, hängt davon ab, in welcher Lage die potentielle Energie des Gesamtsystems, Stab + Gewicht, kleiner ist. Kann man eine gebogene Lage in der Weise finden, daß die Zunahme der Energie infolge der Biegung weniger beträgt als die Abnahme durch das Sinken des Gewichtes, so ist diese gekrümmte Lage stabil, die aufrechte labil. Die Rechnung zeigt, daß die aufrechte Lage so lange die einzig

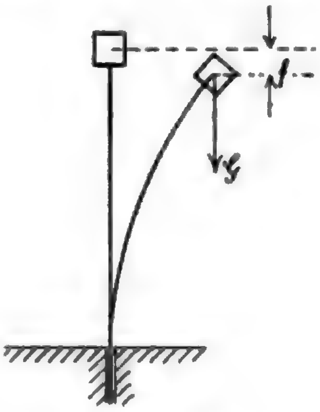


Fig. 14.

mögliche und somit zweifellos stabile Gleichgewichtslage bildet, bis das Gewicht G den sogenannten kritischen Wert (J Trägheitsmoment des Querschnittes, l Länge des Stabes)

$$G_k = \pi^2 \frac{JE}{l^2}$$

nicht erreicht. Bei größerer Belastung gibt es eine gekrümmte Gestalt (eigentlich wenigstens zwei, eine nach rechts und eine nach links), die stabil ist; die aufrechte Lage ist alsdann labil. Der Stab wird durch das Gewicht „geknickt". Dieses Resultat hat bereits Euler gewonnen, der das Problem mit Rücksicht auf die Festigkeit von Säulen behandelte (vgl. den Artikel „Festigkeit").

Aehnliche Fälle kommen bei anderen Anordnungen ebenfalls oft vor. So kann z. B. das Gleichgewicht einer hochkantgestellten schmalen Schiene labil werden, wenn sie durch ein Gewicht in ihrer Ebene gebogen wird. Bleibt die Schiene in der Ebene, wie es zunächst aus Symmetrierücksichten plausibel erscheint, so erleidet sie eine reine Biegung; dabei ist aber die Durchbiegung gering, wegen der großen Biegungssteifigkeit des hochkantgestellten Querschnittes. Eine größere Durchbiegung kann nur erreicht werden, falls die Schiene sich verdreht, wozu natürlich Arbeit geleistet werden muß. Es kann aber vorkommen, daß die zu der Torsion notwendige Arbeitsmenge weniger beträgt, als der Gewinn an Arbeitsfähigkeit durch die größere Durchbiegung bezw. größere Senkung des Gewichtes. Alsdann ist die verdrehte Gestalt die stabile. Aehnliche Fälle treten auch bei Torsion von sehr langen und sehr dünnen Stäben auf.

Digitized by Google

6. Elastizität ursprünglich krummer Stäbe. Federn. Die elastische Deformation ursprünglich krummer Stäbe hat gewisse Bedeutung mit Rücksicht auf die Federn, die bei vielen Konstruktionen, Meßinstrumenten usw. eine wichtige Rolle spielen. Es handelt sich zumeist um die Beziehung zwischen Kraftwirkung und Deformation. Dies war eben das spezielle Problem, an dem das Hookesche Gesetz zuerst erkannt wurde.

Gerade „Biegungsfedern", sowie gerade „Torsionsfedern" (Fäden) werden nach den Formeln gerechnet, die wir für gerade Stäbe abgeleitet haben. In diesem Abschnitt wollen wir nun jene Federn betrachten, die in unbelastetem Zustande eine gekrümmte Zentrallinie besitzen.

Wird ein bereits in einer Ebene gekrümmter Stab in seiner Ebene weiter gebogen, so nimmt man an, daß zwischen der Aenderung der Krümmung und dem Biegungsmoment dieselbe Beziehung besteht wie zwischen Krümmung und Biegungsmoment bei einem geraden Stab von demselben Querschnitt. Wird z. B. ein Kreisbogen vom Radius ϱ_1 in einen Kreisbogen vom Radius ϱ_2 gebogen, so ist

$$\frac{1}{\varrho_2} - \frac{1}{\varrho_1} = \frac{M_b}{JE}.$$

Auf Grund dieser Formel kann man z. B. die Deformation von Spiralfedern (Uhrfedern) berechnen.

Gegenstand vieler Arbeiten bildete die Theorie der „Schraubenfedern". Die Wirkungsweise einer Schraubenfeder besteht lediglich in der Verdrehung (Torsion) der Stabelemente. Wird z. B. eine Schraubenfeder vom Halbmesser r durch die Kraft P, die in der Achse der Schraubenlinie wirken soll, zusammengedrückt, so übt diese Kraft auf jeden Querschnitt ein Torsionsmoment Pr aus. Schneiden wir die Feder durch einen beliebigen Querschnitt durch, so müssen die Torsionsspannungen im Querschnitt diesem Drehmoment das Gleichgewicht halten. Dementsprechend werden die Stabelemente verdreht und die Zusammendrückung der ganzen Schraubenlinie entsteht durch Summation dieser elementaren Verdrehungen. J. Thomson hat gezeigt, daß die Kraft P denselben Weg zurücklegt, als wenn sie am Ende eines geraden Stabes von demselben Querschnitt und derselben Länge (d. h. von einer Länge gleich der Bogenlänge L der Schraubenlinie) mit dem Hebelarm r angebracht und somit ein Torsionsmoment P.r ausüben würde. Der Weg der Kraft ist aber offenbar gleich die Zusammendrückung; sie beträgt

$$\Delta h = \frac{Lr^2}{C} P$$

falls C die Torsionssteifigkeit des Federquerschnittes bezeichnet.

III. Elastizität von Platten und Schalen.

1. Ebene Platten. Die strenge Theorie der elastischen Deformation von Platten bietet bedeutend größere mathematische Schwierigkeiten als die Theorie der Stäbe. Man kann aber eine einfache angenäherte Theorie für den Fall ableiten, daß einerseits die Plattendicke klein ist gegen die übrigen Abmessungen, andererseits aber die Durchbiegung klein ist gegen die Plattendicke. Eine Ausnahme von der Gültigkeit dieser Theorie bilden also die sehr dicken Platten, ferner die sehr leicht biegsamen mit ganz geringer Dicke, die mehr den sogenannten Membranen ähnlich sind. Trifft aber unsere Voraussetzung zu, wie es bei nicht allzu dünnen Platten bei mäßigen Kräften tatsächlich der Fall ist, so kann man die Reckung der Platte in ihrer eigenen Ebene und die Durchbiegung senkrecht dazu vollständig trennen und für beide Arten der Deformation einfache Gleichungen gewinnen. Für die Anwendungen kommt hauptsächlich die Durchbiegung von Platten durch Flüssigkeitsdruck oder senkrechte Einzelkräfte in Betracht.

Als charakteristische Größen für die Formänderung des Plattenelementes sind die „Hauptkrümmungen" zu betrachten. Denkt man sich Schnitte senkrecht zur Tangentialebene der durchgebogenen Fläche, so gehört zu jedem Schnitte ein Krümmungsradius. Von all diesen Krümmungsradien gehören der größte und der kleinste (bezw. größter negativer und größter positiver Wert) zu zwei senkrechten Schnitten. Man bezeichnet diese als Hauptschnitte und die zugehörigen Krümmungsradien als Hauptkrümmungsradien. Ihre Größe und die Orientierung der zugehörigen Schnitte charakterisieren vollkommen die Krümmungsverhältnisse in dem betreffenden Punkte.

Schneiden wir nun ein quadratisches Plattenelement von der Seitenlänge Eins und der Höhe h (Dicke der Platte) aus (vgl. Fig. 15), so liefern die Normalspannungen im gebogenen Zustande an jeder Stirnfläche Momente, die das Plattenelement gebogen halten. Sind die Richtungen x, y speziell parallel zu den Hauptschnitten gewählt, so werden die Momente der Spannungen proportional den Hauptkrümmungen $\frac{1}{R_1}$ und $\frac{1}{R_2}$. Es bestehen die Relationen (M_1 und M_2 die Biegungsmomente)

$$M_1 = \frac{Eh^3}{12} \frac{1}{1-\nu^2} \left(\frac{1}{\varrho_1} + \frac{\nu}{\varrho_2}\right)$$

Digitized by Google

$$M_2 = \frac{Eh^3}{12}\,\frac{1}{1-\nu^2}\left(\frac{1}{\varrho_2}+\frac{\nu}{\varrho_1}\right),$$

wobei ν die Poissonsche Verhältniszahl, E den Elastizitätsmodul des Materials bezeichnet $\left(\frac{h^3}{12}\right.$ ist das Trägheitsmoment eines Querschnittes von der Höhe h und der Breite Eins). Stellt man nun die Gleichgewichtsbedingungen für die Momente und die Kräfte auf, die auf das Plattenelement wirken, so gelangt man zu einer Differen-

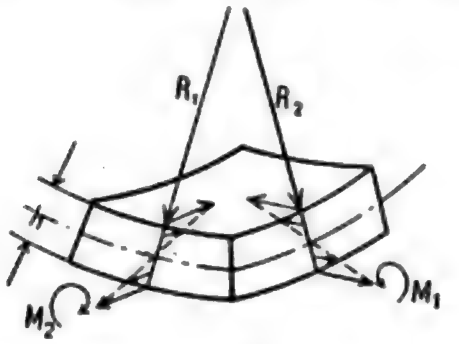


Fig. 15.

tialgleichung für die Durchbiegung, indem man noch die Krümmungen angenähert durch die zweiten Differentialquotienten der Durchbiegung ausdrückt. Die Differentialgleichung der elastischen Fläche lautet dann schließlich

$$\frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}\left(\frac{\partial^4 w}{\partial x^4}+\frac{\partial^4 w}{\partial y^4}+2\,\frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2}\right) = p$$

(w Durchbiegung, p der belastende senkrechte Druck an der betreffenden Stelle x, y). Die Integration dieser Gleichung führt zu der Berechnung der Durchbiegung als Funktion des Ortes. Als Randbedingungen kommen verschiedene Fälle in Betracht: die Platte kann eingeklemmt sein (d. h. an dem Rand ist sowohl Durchbiegung als Tangentialebene der Fläche bestimmt) oder frei aufliegen (in diesem Falle ist nur die Durchbiegung gegeben, dafür muß aber der Rand spannungsfrei bleiben). Je nachdem erhält man verschiedene Formeln für die Durchbiegung.

Für die maximale Durchbiegung (Biegungspfeil) erhält man bei einigen einfachen Anordnungen folgende Ausdrücke (f Biegungspfeil):

Kreisförmige Platte frei aufliegend und in der Mitte durch die Einzelkraft P belastet;

$$f = \frac{3}{4\pi}\,\frac{3+\nu}{1+\nu}\,\frac{PR^2}{h^3(1-\nu^2)E};$$

dieselbe eingeklemmt

$$f = \frac{3}{4\pi}\,\frac{PR^2}{h^3(1-\nu^2)E};$$

frei aufliegend und durch den gleichmäßigen Druck p belastet

$$f = \frac{3}{16}\,\frac{3+\nu}{1+\nu}\,\frac{pR^4}{h^3(1-\nu^2)E},$$

dieselbe eingeklemmt

$$f = \frac{3}{16}\,\frac{pR^4}{h^3(1-\nu^2)E}.$$

Die elastische Deformation der Platten ist übrigens mehr von technischem als von physikalischem Standpunkte aus von Wichtigkeit; für physikalische Messungen eignen sich Platten weniger als dünne Stäbe, da eine sichere, den theoretischen Bedingungen entsprechende Einspannung am Rande schwer zu bewerkstelligen ist.

2. Rohre und Schalen. Die allgemeine Theorie der Deformation ursprünglich krummer Flächen muß die Mittel der Flächentheorie benutzen und so wollen wir uns auf einige besonders einfache Fälle beschränken, in denen die Spannungsverteilung ohne besondere Rechnung durch Gleichgewichtsbetrachtungen ermittelt werden kann.

Ein dünnwandiger Hohlzylinder sei durch inneren oder äußeren Flüssigkeitsdruck belastet. Man kann die Spannung, die in der Wandung auftritt, dadurch ermitteln, daß man das Rohr von der Länge l und dem Halbmesser R längs zwei diametral entgegengesetzten Erzeugenden aufgeschnitten denkt. Alsdann wirkt auf jede Hälfte die Kraft 2plR (p der innere bezw. äußere Ueberdruck). Diese Kraft muß mit den Zug- bezw. Druckspannungen, die in dem Schnitte auftreten, im Gleichgewicht sein; falls die Wandstärke δ klein ist gegen den Halbmesser, kann man die geringen Unterschiede in dem Querschnitt vernachlässigen, und man erhält für die mittlere Spannung, da die Fläche der beiden Schnitte $2l\delta$ beträgt,

$$\sigma = \frac{2plR}{2l\delta} = \frac{pR}{\delta}.$$

Bei den sogenannten Federrohrmanometern wird ein gekrümmtes Rohr mit elliptischem Querschnitt zur Druckmessung angewendet. Wird ein bestimmter Ueberdruck in das Innere des Rohres geleitet, so geht die flache Durchschnittsform in eine weniger flache über, so daß der Krümmungsradius der Zentrallinie vergrößert wird. Das Rohr nähert sich der geraden Gestalt. Der Weg des Endpunktes wird zur Registrierung des Druckes benutzt.

Es sei noch die Deformation einer dünnen Hohlkugel durch inneren Ueberdruck erwähnt. Schneidet man diese durch einen größten Kreis durch, so erfährt jede Hälfte die Kraft $R^2\pi p$. Da die Schnittfläche $2R\pi\delta$ beträgt, so ist die in der Wandung auftretende Zugspannung

$$\sigma = p\,\frac{R}{2\delta}.$$

Sie beträgt die Hälfte der Ringspannung, die bei demselben Ueberdruck bei einem Hohlzylinder von demselben Halbmesser und derselben Wandstärke auftritt.

IV. Dreidimensionale Probleme.

Bei dreidimensionalen Problemen, d. h. bei Körpern von gedrängter Form, deren

Digitized by Google

Abmessungen alle von derselben Größenordnung sind, ist man entweder auf die einfachsten Anordnungen bei der Belastung (z. B. allseitig gleicher Flüssigkeitsdruck) oder auf ganz einfache Körperform (z. B. Kugel, Ellipsoid, Kreiszylinder) beschränkt. Viele der diesbezüglichen Probleme haben nur mathematisches Interesse, und so wollen wir nur einige, auch physikalisch wichtige Fälle behandeln.

1. **Beanspruchung durch allseitigen Flüssigkeitsdruck.** Wird ein Körper von beliebiger Gestalt längs seiner ganzen Oberfläche durch einen gleichmäßigen Druck p belastet, so ist überall im Innern des Körpers eine allseitig gleiche Druckverteilung vorhanden (alle Normalspannungen = p, Schubspannungen = 0). Dieser Umstand ist deshalb von Wichtigkeit, weil er ermöglicht, daß wir die Kompressibilität bei Körpern von beliebiger geometrischer Form einfach ermitteln können. Da jedes Volumelement die spezifische Volumänderung

$$\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z = \frac{p}{K}$$

(K der Kompressibilitätsmodul des Materials) erfährt, so ist die Gesamtänderung des ursprünglichen Volumens v

$$\Delta v = \frac{p}{K} v,$$

und durch Messung von Δv kann der Kompressibilitätsmodul bestimmt werden.

Die Messung der Kompressibilität fester Körper steht in engem Zusammenhang mit der Bestimmung der Kompressibilität von Flüssigkeiten, da man bei der ersten Aufgabe eine Flüssigkeit als Druckvermittler, bei der zweiten Aufgabe einen festen Körper als Behälter braucht. Beide Messungen werden durch „Piezometer" ausgeführt und so wollen wir die diesbezüglichen Meßmethoden mit Rücksicht auf beide Probleme besprechen.

1a) Methoden zur Messung der Kompressibilität von festen Körpern und Flüssigkeiten. Die ersten Messungen über Kompressibilität gehen sehr weit zurück; sie bezogen sich zunächst auf Flüssigkeiten. Ein Demonstrationsveruch stammt bereits von Bacon (1620). J. Canton (1761) war der erste, der quantitative Messungen darüber ausführte; er untersuchte die Kompressibilität von Wasser und Quecksilber. In der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts sind dann ausgedehnte Messungen über Kompressibilität ausgeführt worden. Es sind hauptsächlich die Versuche von Oersted (1882), Sturm und Colladon (1827) und Regnault (1848) zu erwähnen. Oersted konstruierte den ersten Piezometer, d. h. ein Gefäß, welches in ein Kapillarrohr ausläuft, so daß die Volumänderung der darin enthaltenen Flüssigkeit genau gemessen werden kann. Allerdings hat Oersted nicht berücksichtigt, daß, falls der ganze Apparat in einen Raum unter hohen Druck gesetzt wird, die gemessene Volumänderung nicht der Kompressibilität der Flüssigkeit, sondern der Differenz seiner Kompressibilität und jener des Gefäßmaterials entspricht. Er glaubte, die Deformationen des dünnwandigen Zylinders vernachlässigen zu können, während man doch allgemein nachweisen kann, daß unabhängig von der Wandstärke die Kapazität des Gefäßes in dem Maße sich ändert, wie ein fester Körper von demselben Volumen, der aus dem Material des Gefäßes besteht, unter dem gleichen Drucke sein Volumen ändern würde. Sturm und Colladon wollten diesen Fehler berücksichtigen; sie setzten aber die Kompressibilität gleich dem dreifachen Werte des Dehnungskoeffizienten, der dem longitudinalen Zug entspricht. Dies ist indessen nicht exakt. Die Frage wurde zuerst von Regnault richtig erledigt; er bestimmte gleichzeitig die Kompressibilität der Flüssigkeit und des als Behälter dienenden festen Körpers, indem er einen Apparat konstruierte, in welchem der Druck einmal nur auf die äußere Fläche des Gefäßes, dann nur im Innern desselben und schließlich sowohl von außen, als im Innern wirkte.

Von moderneren Meßapparaten sei der Piezometer von Amagat, ferner der von Richards und Stull erwähnt.

1b) Experimentelle Ergebnisse über Kompressibilität von Flüssigkeiten. Analog zur Kompressibilität der festen Körper wäre für die Kompressibilität der Flüssigkeiten das Verhältnis der Volumänderung zu dem entsprechenden Drucke zu setzen. Für kleine Drucke ist dieser Ansatz in der Tat ausreichend, bei großen Drucken ist aber die Kompressibilität so stark veränderlich, daß man eine jeweilige, von dem Druck abhängige Kompressibilität

$$k = \frac{1}{v}\frac{dv}{dp}$$

einführt. Diese ist offenbar als spezifische Volumänderung für eine Druckerhöhung um 1 atm. zu deuten.

Die Kompressibilität nimmt im allgemeinen mit wachsendem Drucke ab. So erhielt Amagat zwischen 0 und 3000 atm. folgende Werte:

Werte für $10^6 . k$

Druck	Wasser	Aether	Alkohol
1— 500 at	47,5	107,2	76,9
500—1000 at	41,6	70,8	56,6
1000—1500 at	35,8	53,7	45,8
1500—2000 at	32,4	45,2	38,5
2000—2500 at	29,2	37,1	33,1
2500—3000 at	26,1	31,7	28,4

Digitized by Google

Mit der Temperatur nimmt die Kompressibilität der meisten Flüssigkeiten zu; eine Ausnahme bildet das Wasser, das bei niedrigen Drucken die Anomalie zeigt, daß seine Kompressibilität etwa bis 50° abnimmt, dann wieder zunimmt (das genaue Minimum liegt etwa bei 62°). Amagat fand, daß diese Anomalie bei hohen Drucken zurücktritt.

Es ist eine interessante Frage, wie weit in einer Flüssigkeit Zugspannungen auftreten können. Man kann in dieser Richtung folgende Beobachtung anführen: Füllt man eine dünnwandige Hohlkugel völlig mit einer Flüssigkeit und läßt dieselbe abkühlen, so kann man zunächst keine Volumänderung beobachten; die Flüssigkeit haftet überall an der Wand. Daraus muß man schließen, daß die ganze Flüssigkeitsmasse unter Zugspannung steht. Man hat in dieser Weise eine Zugspannung von 17 atm. nachgewiesen. Eine Zugspannung kann natürlich, da die Flüssigkeit keine Gestaltselastizität besitzt, nur bei allseitig gleichem Zug auftreten.

1c) Experimentelle Resultate über Kompressibilität fester Körper. Einige Kompressibilitätszahlen sind in der folgenden Zahlentafel zusammengestellt; es sei bemerkt, daß man die Kompressibilität aus den beiden Elastizitätskonstanten auch rechnerisch ermitteln kann.

Kompressibilität (k) einiger fester Körper.

Stoffe	10^6 k	Stoffe	10^6 k
Turmalin	0,113	Gläser	1,7—2,9
Topas	0,61	Quarz	2,67
Stahl	0,68	Blei	2,77
Beryll	0,75	Steinsalz	4,2—5,0
Flußspat	1,20	Sylvin	5,6—7,4
Kupfer	0,86—1,23		

Bezüglich des Einflusses hoher Drucke hat Amagat bei den meisten Stoffen bis 2000 Atm. nur eine geringe Abnahme der Kompressibilität gefunden. Sehr stark ist dagegen die Abnahme, und zwar schon bei geringen Drucken bei Kautschuk.

Ueber die Abhängigkeit der Kompressibilität von der Temperatur sind wenig Versuche vorhanden. Würde der Elastizitätsmodul und die Poissonsche Konstante ν sich um denselben prozentuellen Betrag mit der Temperatur ändern, so müßte für Stoffe bei denen $\nu > 1/4$ ist, die Kompressibilität mit der Temperatur abnehmen, für Stoffe mit $\nu < 1/4$ zunehmen. Diese Folgerung scheinen die Versuche im allgemeinen zu bestätigen.

2. Deformation einer Kugel. Elastizität der Erde. Von den geometrisch einfachen Körpern, für welche die Grundgleichungen der Elastizitätslehre für beliebige Belastungen vollständig gelöst werden können, verdient hauptsächlich die Kugel besondere Beachtung, da man durch diese Rechnungen in die Lage gesetzt wird, die elastische Nachgiebigkeit der Erde abzuschätzen.

Es sind hauptsächlich zwei Fragen von Interesse: die Abplattung der Erde durch die Rotation und der Einfluß der Gezeiten, d. h. der periodischen Wirkung von Mond und Sonne auf den Erdkörper. Die Rechnungen werden zumeist unter der Annahme durchgeführt, daß die Kompressibilität der Erde vernachlässigt werden kann. In diesem Falle kann man die Deformation der elastisch festen, inkompressiblen Kugel mit jener einer flüssigen gravitierenden Masse unmittelbar vergleichen. Man gelangt zu dem Resultate, daß die Abplattung durch die tägliche Rotation bei einer flüssigen Kugel $1/_{230}$ betragen würde, während bei einem elastischen Körper von derselben Abmessung $1/_{383}$ herauskäme, falls man den Elastizitätsmodul etwa dem des Glases gleichsetzt. Die tatsächliche Abplattung ist etwa $1/_{297}$. Es ist dabei interessant, daß ein elastisch fester Körper von der Größe der Erde durch die Rotation eine Abplattung von derselben Größenordnung erleidet wie eine flüssige Masse. Allerdings kann man aus diesem Resultat keine bestimmte Abschätzung für den Elastizitätsmodul der Erde gewinnen, da man sich durch Rechnung überzeugen kann, daß eine Inhomogeneität der Dichte, die bei der Erde sicher vorhanden ist, die Deformation ganz erheblich beeinflußt.

Etwas sicherer wird die Abschätzung durch die Berechnung der Deformationen, die den Gezeiten entsprechen. Die Berechnung der Abplattung läßt zunächst auch die Möglichkeit zu, daß die Erde in ihrem Innern wesentlich aus flüssigen Substanzen besteht, deren Deformation die äußere Schale nur ganz wenig vermindert. Diese Möglichkeit wird nun durch die Tatsache ausgeschaltet, daß man überhaupt relative Verschiebungen des Meeres gegen das Festland beobachtet; wäre die Erde lediglich flüssig, so würde sie den periodischen Attraktionswirkungen beinahe wie eine Flüssigkeit nachgeben. Man findet die Erhöhung der Meeresoberfläche um ein Drittel kleiner, als nach der Annahme einer flüssigen Kugel sich ergeben würde. Diese Verminderung ist offenbar eine Folge der geringeren Nachgiebigkeit der Erde. Die Berechnung zeigt, daß die Erde einen mittleren Elastizitätsmodul von der Größenordnung des Elastizitätsmoduls des Stahls besitzen muß, um diese Verminderung der Gezeitenwirkung hervorzurufen. Ganz ähnliche Folgerungen

Digitized by Google

lassen die periodischen Lotabweichungen zu, die infolge der täglichen Aenderung der Mondanziehung auftreten; ferner die Verlängerung der Periode der Breitenschwankungen (Präzession der Erdachse) auf 427 Tage statt der theoretisch berechneten Periode von 306 Tagen. Diese Verlängerung der Periode soll ebenfalls eine Folge der Deformation, namentlich einer Veränderung der Trägheitsmomente durch die Deformation sein.

3. Berührung fester Körper. Ein eigenartiges Problem, welches für viele Anwendungen von Wichtigkeit ist und von Hertz in vollständiger Weise gelöst wurde, bietet die Berührung fester Körper. Werden z. B. zwei elastische Kugeln durch die Kraft P aneinander gedrückt (s. Fig. 16), so berühren

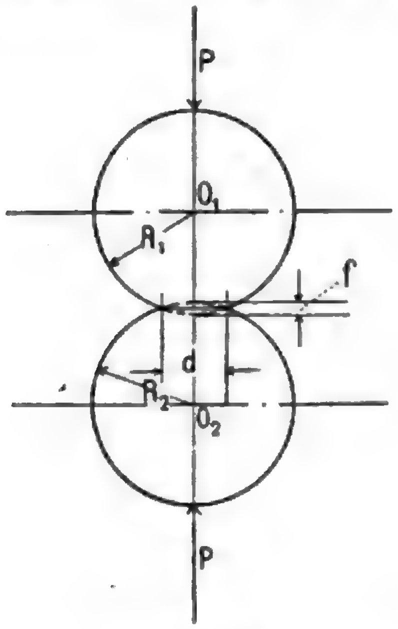


Fig. 16.

sie sich nicht in einem Punkte, wie es bei starren Kugeln der Fall wäre, sondern es entsteht infolge der elastischen Deformation eine kleine kreisförmige Druckfläche. Ist der Halbmesser der Druckfläche klein gegen den Halbmesser der Kugeln, so kann die Verteilung der Spannungen und die entsprechende Deformation in der Nähe der Berührungsstelle vollständig diskutiert werden. Bezeichnen wir die Halbmesser der beiden Kugeln mit R_1 und R_2, so ergibt sich für den Durchmesser der Druckfläche (G Gleitmodul, ν Poissonsche Verhältniszahl)

$$d = \sqrt[3]{\frac{4}{3}\,\frac{(1-\nu)}{G}}\;\sqrt[3]{P\,\frac{R_1 R_2}{R_1+R_2}}$$

und für die Annäherung der beiden Kugelmittelpunkte

$$f = \sqrt[3]{\frac{16}{9}\,\frac{(1-\nu)^2}{G^2}}\;\sqrt[3]{P^2\,\frac{R_1+R_2}{R_1 R_2}}.$$

Für den einfachsten Fall, daß eine Kugel in eine ebene Fläche von demselben Material eingedrückt wird, beträgt die Abplattung

$$f = \sqrt[3]{\frac{16}{9}\,\frac{(1-\nu)^2}{G^2}}\;\sqrt[3]{\frac{P^2}{R}}$$

und der Durchmesser der Druckfläche

$$d = \sqrt[3]{\frac{32}{3}\,\frac{(1-\nu)}{G}}\;\sqrt[3]{PR}.$$

Die Hertzschen Rechnungen wurden schon von ihm selbst zu dem Zwecke benutzt, ein absolutes Maß für die Härte fester Körper aufzustellen. Eine andere Anwendung besteht in der Berechnung der Stoßdauer beim Zusammenstoß von elastischen Körpern. Handelt essich z. B. um den Stoß zweier Kugeln, so kennen wir auf Grund der Hertzschen Formel die Kraft als Funktion der Annäherung der beiden Kugelmittelpunkte. Man kann also den Kraftverlauf während der Annäherung und der Wiederentfernung der beiden Kugelmittelpunkte verfolgen, und da andererseits für die beiden Körper das Gesetz: Kraft = Masse × Beschleunigung: gelten muß, so kann man daraus die Dauer des Stoßes berechnen. Es zeigt sich, daß diese mit der fünften Wurzel jener Geschwindigkeit umgekehrt proportional ist, mit der die beiden Kugeln sich einander nähern. Dieses Resultat ist auch experimentell bestätigt worden.

V. Hysteresiserscheinungen.

Falls ein belasteter elastischer Körper wieder entlastet wird, so findet man durch genauere Beobachtung, daß der Vorgang irreversibel ist, d. h. denselben Belastungen entsprechen während der Entlastung andere und zwar stets größere Deformationen als bei der Belastung der Fall war. In dieser Irreversibilität sind jedoch eigentlich zwei Erscheinungen vermischt: Es ist zunächst ein Verzögern der elastischen Deformation vorhanden, d. h. ein Teil des Deformationsrestes verschwindet noch, falls wir nur dem Körper genügende Zeit gewähren. Dagegen bleibt ein oft nicht unbeträchtlicher Teil bestehen. Speziell diese zweite Art der Irreversibilität, die Verschiedenheit der Gleichgewichtsdeformationen (Ruhelagen) bei Belastung und Entlastung, nennt man Hysteresis, während man die verzögerte Deformation der „elastischen Nachwirkung" zuschreibt. Natürlich sind die beiden Effekte praktisch sehr schwer zu trennen, da die nachwirkende Deformation langsam vor sich geht, und es ist eine Bewegung noch nach Stunden, Tagen, sogar Wochen zu merken. Trotzdem scheint es zweifellos zu sein, daß die Enddeformation, der der Körper während dieses langsam verlaufenden Prozesses zu-

Digitized by Google

strebt, merklich verschieden ist von derjenigen, die derselben Belastung bei Beanspruchung in dem entgegengesetzten Sinne entspricht.

Man kann die Verhältnisse am besten übersehen, falls man die Beziehung zwischen Spannung und Dehnung graphisch darstellt. Um die Ideen zu fixieren, wollen wir einen einfachen Zugversuch betrachten; bei Biegung und Torsion sind jedoch die Verhältnisse ganz ähnlich.

Trägt man die Zugspannung als Ordinate, die Dehnung als Abszisse auf (s. Fig. 17), so

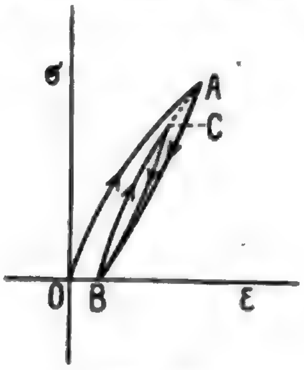


Fig. 17.

ist im allgemeinen bei der ersten Belastung eine Abweichung von dem Hookeschen Gesetze in dem Sinne vorhanden, daß die Dehnungen etwas rascher zunehmen als die Spannungen. Die entsprechende Kurve ist also von unten konkav. Man nennt diese, der ersten Deformation entsprechende Kurve die „jungfräuliche". Wird nun die Belastung z. B. im Punkte B unterbrochen und der Stab langsam entlastet, so erhält man eine entgegengesetzt gekrümmte Kurve, die ganz unterhalb der jungfräulichen Kurve liegt. Es ist nun eine sehr merkwürdige Erscheinung, die aber den analogen Vorgängen der magnetischen Hysteresis genau entspricht, daß nach Umkehrung in einem beliebigen Punkte C die neue Belastungskurve genau in den vorigen Umkehrpunkt B hereinläuft. Man erhält einen geschlossenen „Zykel" zwischen B und C; bei Wiederholung der Belastung und Entlastung zwischen diesen Grenzen wird dann stets derselbe Zykel durchlaufen. Kehrt man aber in einem Zwischenpunkte D um, so läuft die Entlastungskurve wieder in den vorletzten Umkehrpunkt C ein. Man sieht, daß man in dieser Weise, solange die Belastung innerhalb der den Punkten B und C entsprechenden Grenzen bleibt, nie aus dem ersten Zykel herauskommt; innerhalb des Zykels kann man aber einen beliebigen Punkt erreichen.

Bezüglich der Form der Kurven ist es auffallend, daß die Anfangstangente jeder Kurve parallel ist und ungefähr dieselbe Neigung besitzt, wie die jungfräuliche Kurve im Punkte O. Man darf also annehmen, daß nach jeder Umkehr der Anfang der Deformation genau dem Hookeschen Gesetze gehorcht. Man schließt daraus, daß durch die Deformation ein Teil der Moleküle des festen Körpers die Verbindung zu ihrer ursprünglichen Gleichgewichtslage verloren hat und in eine andere stabile Konfiguration übergegangen ist. Für die neue Konfiguration sind die Verhältnisse nun ganz analog wie in dem undeformierten Zustande: kleine Deformationen sind völlig reversibel und Spannungsänderungen proportional der Deformation. Unmittelbar nach der Umkehr (z. B. in B), sind also alle Deformationen umkehrbar: die Moleküle, deren Gleichgewichtslage nicht geändert worden ist, streben der alten Gleichgewichtslage zu, die anderen ihren neuen Gleichgewichtslagen. Wären diese miteinander verträglich, so würde die Entlastungskurve von einer geraden Linie nicht merklich abweichen und nicht in den alten Umkehrpunkt C zurückkehren. Es ist aber sehr plausibel, daß dies nicht der Fall sein kann: die Moleküle, die ihre alte Gleichgewichtslage noch nicht erreicht haben, zwingen sozusagen die anderen, ihre Gleichgewichtslage wieder zu verlassen, bis Alles in die alte Konfiguration zurückgekehrt ist.

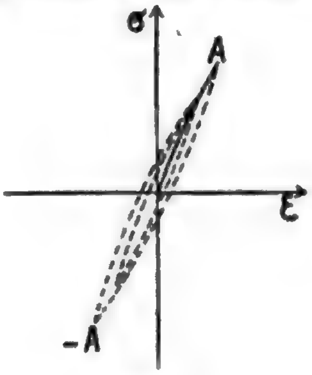


Fig. 18.

Es ist noch die eigenartige Rolle der jungfräulichen Kurve zu erklären, die ganz aus dem Zykel herausfällt. Dieser Punkt wird gewissermaßen durch die folgende Beobachtung geklärt: setzt man die Belastung nach einmaliger Entlastung in dem entgegengesetzten Sinne fort (s. Fig. 18), so kann man einen Zykel herstellen, dessen Mittelpunkt der Nullpunkt bildet. Man kann nun in den Nullpunkt zurückgelangen, indem man den Körper eine Art Spirale durchlaufen läßt in der Weise, daß man stets kurz vor Schließen eines Zykels den Belastungssinn umkehrt. Wird nun der Körper von dem Nullpunkt aus wieder belastet, so erhält man die jungfräuliche Kurve wie bei der ersten Belastung; sie geht dabei durch sämtliche Umkehr-

punkte der Spirale durch. Durch die Belastung zwischen langsam zu Null abnehmenden Grenzen wird sozusagen der Einfluß der vorangegangenen Deformationen ausgeschaltet, und der Körper befindet sich wieder in jungfräulichem Zustande. Man kann aber auch für einen beliebigen anderen Punkt der Ebene den Körper in diesen Zustand versetzen, d. h. von den vorangegangenen Deformationen unabhängig machen, indem man dafür sorgt, daß man durch langsam abnehmende Zykeln in den Punkt gelangt. Wiederbelastet wird der Körper eine der jungfräulichen ganz ähnliche Kurve beschreiben, die man — da sie wieder durch alle Umkehrpunkte der Zykeln hindurchgeht — als „Durchschreitungskurve" bezeichnet.

Eine mathematische Theorie dieser Vorgänge fehlt bisher vollständig. Es muß außerdem bemerkt werden, daß das eben Berichtete ein idealisiertes Schema der Vorgänge bietet. Es treten hauptsächlich zwei Erscheinungen störend hinzu:

a) Die Zykeln werden genau nur dann wiederholt, falls sie zwischen nicht allzuweiten Spannungsgrenzen und insbesondere bei nicht allzugroßen Deformationen verlaufen (d. h. bei schmalen Zykeln). Erstreckt sich der Zykel auf große Deformationen, so verschiebt er sich bei jeder Wiederholung nach der Richtung der wachsenden Deformationen, d. h. es tritt stets ein neuer Dehnungsrest hinzu.

b) Es ist gewissermaßen „Akkommodation" vorhanden, besonders bei den ersten Wiederholungen. Die Zykeln werden schmaler und schmaler. Dieser Einfluß läßt sich aber fast ganz eliminieren, wenn man die Zykeln erst mehrere Male durchlaufen läßt.

Nach den dargestellten Gesetzmäßigkeiten kann zwar die Hysteresis als irreversibler Vorgang bezeichnet werden, aber nur in einem beschränkten Sinne, indem jeder Zustand doch nochmals zu erreichen ist. Energetisch bedeutet jeder Zykel natürlich einen Arbeitsverlust, und zwar ist die eingeschlossene Fläche unmittelbar proportional der bei jeder Wiederholung geleisteten Arbeit. Diese Energiemenge geht in Bewegungsenergie der Moleküle (Wärme) über.

VI. Elastische Nachwirkung.

1. Gedämpfte Schwingungen. Logarithmisches Dekrement. Eine der einfachsten jener Tatsachen, die in den Bereich der Nachwirkungserscheinungen gehören, ist die innere Dämpfung der elastischen Schwingungen. Wird z. B. ein am oberen Ende befestigter vertikaler Stab am unteren Ende mit einem Gewicht verbunden und in Torsionsschwingungen versetzt, so würde nach dem Hookeschen Gesetze die Bewegungsgleichung für das schwingende Gewicht folgendermaßen lauten (vgl. II, 3):

$$D\frac{d^2\vartheta}{dt^2} + \frac{J_pG}{l}\vartheta = 0$$

(D Trägheitsmoment des Gewichtes um die Stabachse, J_pG Torsionssteifigkeit des kreisförmig vorausgesetzten Querschnittes, l Stablänge). Der Stab würde — wie dies bei voller Reversibilität der elastischen Vorgänge nicht anders zu erwarten ist, mit konstanter Amplitude Schwingungen ausführen. Nun beobachtet man in Wirklichkeit eine Abnahme der Amplitude, die im allgemeinen viel größer ist, als der einzigen äußeren Kraft, dem Luftwiderstande, entsprechen würde. Man kann der Erscheinung durch die Annahme einer inneren Reibung des festen Körpers Rechnung tragen, die man proportional der Deformationsgeschwindigkeit, d. h. der zeitlichen Aenderung der Deformationsgrößen voraussetzt. Man wird also das Hookesche Gesetz in der Weise zu ergänzen haben, daß man zu den Gliedern, die proportional den Deformationsgrößen sind, andere hinzufügt, die der zeitlichen Aenderung der Dehnungen und Winkeländerungen proportional sind. Setzen wir insbesondere für den Fall der Torsion

$$M_t = \frac{J_pG}{l}\left(\vartheta + \varkappa\frac{d\vartheta}{dt}\right),$$

wo $\varkappa$ die Reibungskonstante der Torsionsdeformation genannt wird, so geht die obige Gleichung in

$$D\frac{d^2\vartheta}{dt^2} + \frac{J_pG}{l}\varkappa\frac{d\vartheta}{dt} + \frac{J_pG}{l}\vartheta = 0$$

über. Die Lösung kann man schreiben:

$$\vartheta = \vartheta_0 e^{-\frac{\lambda t}{T}} \sin\frac{2\pi t}{T},$$

T ist offenbar die Dauer einer Schwingung; falls die Reibungskonstante $\varkappa$ klein ist, so unterscheidet sich die Schwingungszeit sehr wenig von dem Werte $T = 2\pi\sqrt{\frac{Dl}{J_pG}}$, den man unter Weglassung des Reibungsgliedes erhält. Die Bedeutung von λ ist ebenfalls ersichtlich. Das Verhältnis zweier nachfolgenden maximalen Amplituden (z. B. für $t = \frac{T}{2}$ und $t = \frac{3T}{2}$) beträgt offenbar $e^{-\lambda}$ d. h. λ ist der negative Logarithmus des Verhältnisses zweier nacheinanderfolgender maximalen Ausschläge. Diese Größe wird das „logarithmische Dekrement" genannt und ist ein direktes Maß für die Dämpfung. Aus der Schwingungsgleichung folgt für λ

$$\frac{\lambda}{T} = \varkappa\frac{J_pG}{Dl}.$$

Mit derselben Annäherung, wie früher, wird

$$4\pi^2\lambda = \frac{\varkappa}{T}.$$

Digitized by Google

Falls daher $\varkappa$ eine Materialkonstante sein soll, so muß das logarithmische Dekrement umgekehrt proportional der Schwingungszeit sein. Wir werden später sehen, daß man vom Standpunkte der Nachwirkungstheorie aus zu der Folgerung gelangt, daß das logarithmische Dekrement unabhängig sei von der Schwingungsdauer. Nach den Beobachtungen trifft keine dieser Forderungen exakt zu; doch ist die zweite Forderung für die meisten Körper besser erfüllt.

Nach der obigen Formel würde die Amplitude in geometrischer Reihe abnehmen, d. h. das logarithmische Dekrement wäre unabhängig von der Amplitude. In der Wirklichkeit tritt fast immer eine Zunahme des logarithmischen Dekrements mit der Amplitude auf, und zwar oft in sehr beträchtlichem Maße. Große Schwingungen werden rascher gedämpft, als kleine. Auch die Abhängigkeit der Dämpfung von der Temperatur bildete den Gegenstand zahlreicher Untersuchungen. Im allgemeinen nimmt sie mit wachsender Temperatur stark zu und zwar weniger bei niedrigen Temperaturen als zwischen 0 und 100°. So ist z. B. bei Aluminium die Dämpfung der Schwingungen bei 0° 8 mal, bei 100° 270 mal so groß wie bei der Temperatur der flüssigen Luft. Einige Metalle (Gold, Magnesium) zeigen bei ganz niedrigen Temperaturen wieder eine Zunahme der Dämpfung.

2. Verzögerte Deformation und Relaxation. Während man bei dem periodischen Vorgange der gedämpften Schwingungen mit der, offenbar der Theorie der Flüssigkeiten entnommenen Vorstellung von einer inneren Reibung auskommt, sind die eigentlichen Nachwirkungserscheinungen in engerem Sinne durch eine solche Annahme nicht zu erklären. Man kann zwei sehr charakteristische Tatsachen hervorheben: die Tatsache der verzögerten Deformation unter konstanter Belastung und die sogenannte Relaxation der Spannung bei konstanter Deformation.

Als verzögerte Deformation bezeichnet man die Erscheinung, daß sowohl bei Belastung als Entlastung die endgültige Deformation erst nach längerer Zeit erreicht wird. Diese Erscheinung wurde zuerst von W. Weber beobachtet und von Kohlrausch eingehend untersucht. Kohlrausch untersuchte auch als erster die Erscheinung der Relaxation. Man versteht darunter folgende Tatsache: Dauert eine Deformation längere Zeit, so nimmt die zur Erhaltung derselben notwendige Kraft während der Belastungszeit ab. Die beiden Erscheinungen stehen offenbar in engem Zusammenhang. So ist die verzögerte (nachträgliche) Deformation als eine Folge der Relaxation aufzufassen: nimmt nämlich die zu der Erhaltung der Deformation notwendige Kraft zeitlich ab, so wird bei konstanter Kraftwirkung (z. B. Belastung durch ein angehängtes Gewicht) die überschüssige Kraft weitere Deformationen hervorrufen. Umgekehrt kann man die Relaxation als eine Folge der nachträglichen Deformation darstellen.

Die grundlegende Frage ist naturgemäß die zeitliche Gesetzmäßigkeit beider Vorgänge. Verschiedene Forscher haben die verschiedensten empirischen Formeln aufgestellt, von denen jedoch keine allgemeine Gültigkeit zu beanspruchen vermag. Die Annahme einer von der Geschwindigkeit der Deformation abhängigen Viskosität könnte zwar qualitativ die verzögerte Deformation erklären; der Relaxation kann sie aber nicht gerecht werden, weil bei konstanter Deformation die innere Reibung überhaupt Null wäre. Außerdem verlaufen die Nachwirkungserscheinungen viel zu langsam, um als eine Folge jener inneren Reibung erklärt werden zu können, die man aus den Beobachtungen über gedämpfte Schwingungen herleitet. Die Theorie mußte hier neue Bahnen suchen.

Maxwell wollte alle Vorgänge, die scheinbar auf Viskosität deuten, bei Körpern von beliebigem Aggregatzustande auf die Relaxation zurückführen. Nach seiner Vorstellung ist die Grundtatsache die, daß sich jeder Körper der Deformation akkommodiert, falls diese längere Zeit besteht; dies äußert sich in einer zeitlichen Abnahme der Spannung. Er setzte — um zu einer annähernden Theorie zu gelangen — die Abnahme der Spannung in der Zeiteinheit proportional der jeweiligen Spannung und umgekehrt proportional einer konstanten Zeitgröße T, die er Relaxationszeit nannte und die für die Substanz charakteristisch sein soll. Bei elastischen Medien soll T ganz groß sein (Stunden, Tage), bei Flüssigkeiten ganz klein (ein kleiner Bruchteil einer Sekunde). Ist die Beziehung zwischen Spannung und Dehnung (z. B. bei longitudinalem Zug eines Stabes) ohne Berücksichtigung der Relaxation

$$\sigma = E\varepsilon,$$

so wäre die zeitliche Aenderung der Spannung bei irgendeiner Aenderung der Deformation

$$\frac{d\sigma}{dt} = E\frac{d\varepsilon}{dt}.$$

Nun tritt infolge der Relaxation eine Abnahme der Spannung in der Zeiteinheit vom Betrage $\frac{\sigma}{T}$ hinzu, d. h. wir erhalten die Gleichung

$$\frac{d\sigma}{dt} = E\frac{d\varepsilon}{dt} - \frac{\sigma}{T}.$$

Digitized by Google

Für konstante Deformation $\frac{d\varepsilon}{dt} = 0$ würde folgen

$$\frac{d\sigma}{dt} = -\frac{\sigma}{T}$$

oder (σ_0 der anfängliche Wert von σ)

$$\sigma = \sigma_0 \, e^{-\frac{t}{T}}$$

d. h. eine exponentielle Abnahme der Spannung mit der Zeit. Die Relaxationszeit kann als jene Zeit gedeutet werden, in der die Spannung auf den $\frac{1}{2{,}73\ldots}$-fachen Wert des ursprünglichen Wertes heruntersinkt.

Man ist zwar durch den einfachen Maxwellschen Ansatz nicht imstande, die verwickelten zeitlichen Gesetze der tatsächlichen Relaxation wiederzugeben, außerdem liefert der Ansatz keine zwanglose Erklärung für die verzögerte Deformation (namentlich bei Entlastung), trotzdem ist es sehr beachtenswert, daß Maxwell gewissermaßen der Dauer des Deformationszustandes einen Einfluß zuschrieb. Man wird zu dieser Auffassung gezwungen durch die Beobachtungen über die Superponition der Nachwirkung von Deformationen, die nacheinander in entgegengesetztem Sinne vorgenommen wurden. Wird z. B. ein Stab zuerst nach rechts tordiert und längere Zeit in diesem Zustande gehalten, dann während einer kürzeren Zeit nach dem entgegengesetzten Sinne gedreht, so kehrt er nach der Entlastung zuerst von links nach rechts zurück; diese Bewegung wird aber immer langsamer, der Stab dreht sich sogar wieder um einen kleineren Betrag nach links, und schließlich wieder zurück gegen die ursprüngliche Gleichgewichtslage. Man muß die Drehung nach links offenbar als eine noch immer bestehende Nachwirkung der langdauernden früheren Rechtsdrehung deuten, die durch die rascher abklingende Nachwirkung der kurzen Linksdrehung überdeckt wurde. Aehnlich kann man die Ueberlagerung der Nachwirkung mehrerer in verschiedenem Sinne vorangegangener Deformationen beobachten. Man muß also schließen, daß der jeweilige Zustand von allen zeitlich vorangegangenen Zuständen, d. h. der ganzen „Vorgeschichte" des Körpers, abhängig ist. Diese Auffassung hat ihren mathematischen Ausdruck zuerst in Boltzmanns Theorie der elastischen Nachwirkung gefunden.

3. Die Boltzmannsche Theorie der elastischen Nachwirkung. Soll der Einfluß der gesamten Vorgeschichte des Körpers berücksichtigt werden, so muß offenbar jede vorangehende Deformation mit gewissem Gewicht in Betracht kommen, welches desto kleiner ist, je länger der betreffende Deformationszustand zeitlich zurückliegt. Wir wollen wieder den Fall der Torsion betrachten, auf den sich ohnehin die meisten Beobachtungen beziehen. Ohne Nachwirkung wäre das Drehmoment, welches einer Verdrehung des Stabes von der Länge l mit einem Winkel vom Betrage ϑ entspricht, gleich

$$M = \frac{J_p G}{l} \vartheta,$$

wo ϑ offenbar die jeweilige Verdrehung zur Zeit t bedeutet. Hat aber die Deformation zur Zeit $t = 0$ bereits begonnen und ist die Verdrehung in einem beliebigen Zeitpunkt τ zwischen $0 < \tau < t$ gleich $\vartheta(\tau)$ gewesen, so berücksichtigt Boltzmann den Einfluß all dieser vorangegangenen Deformationen dadurch, daß er von dem Betrage $G.\vartheta$ das Integral über sämtliche Deformationen während der Zeit von 0 bis t abzieht, wobei jede Deformation mit einer Größe multipliziert wird, welche von der verstrichenen Zeit $t - \tau$ abhängig ist, d. h. mit einer Funktion $\psi(t - \tau)$ von $t - \tau$. Dieses ψ ist eine charakteristische Funktion des Materials, welche sozusagen für die „Erinnerung" des Körpers kennzeichnend ist; sie drückt aus, wie stark der Einfluß eines Zustandes noch besteht, welcher eine gewisse Zeit $t - \tau$ bereits zurückliegt. Das Drehmoment wird also mit Berücksichtigung der Nachwirkung

$$M = \frac{J_p}{l}\left[G\vartheta - \int_0^t \vartheta(\tau)\,\psi(t-\tau)\,d\tau\right].$$

Boltzmann hat nun gezeigt, daß dieser Ansatz geeignet ist, alle charakteristischen Erscheinungen der Nachwirkung darzustellen. Die Erinnerungsfunktion kann durch einen Vorgang experimentell bestimmt werden, und alsdann ist man imstande, auf die zeitlichen Gesetze der übrigen Vorgänge zu schließen.

Wir wollen nur die einfachsten Fälle betrachten:

a) Verzögerte Deformation. Die Deformation beginnt um $t = 0$. Von diesem Zeitpunkte an bis $t = T$ sei die Verdrehung konstant und gleich ϑ_0. Zur Zeit $t = T$ wird der Stab entlastet; es fragt sich, wie geht die Detorsion zeitlich vor sich? Da nach $t = T$ das Drehmoment verschwindet, so ist während der Entlastungszeit

$$M = \frac{J_p}{l}\left[G\vartheta - \vartheta_0 \int_0^T \psi(t-\tau)\,d\tau\right] = 0$$

oder

$$\vartheta = \frac{\vartheta_0}{G} \int_0^T \psi(t-\tau)\,d\tau.$$

Digitized by Google

Nach längerer Zeit ist $t - \tau$ nur sehr wenig verschieden von t, so daß man setzen kann

$$\vartheta = \frac{\vartheta_0 T}{G} \psi(t),$$

d. h. ϑ proportional $\psi(t)$. Der Verlauf der Detorsion liefert also den Weg zur experimentellen Bestimmung der Funktion ψ.

b) Relaxation. Die Deformation beginne wieder bei $t = 0$. Von diesem Zeitpunkte an sei sie konstant, entsprechend einer Verdrehung ϑ_0. Der Anfangswert des Drehmoments sei M_0; es fragt sich, nach welchem Gesetze das Drehmoment, welches zur Erhaltung der konstanten Verdrehung notwendig ist, abnimmt. Aus unserem Ansatz folgt

$$\frac{Ml}{J_p} = G\vartheta_0 - \vartheta_0 \int_0^t \psi(t-\tau)d\tau$$

oder, falls man die seit einem bestimmten Zustande verstrichene Zeit $t - \tau$ mit ω bezeichnet,

$$M = \vartheta_0 \frac{J_p}{l} \left\{ G + \int_t^0 \psi(\omega)d\omega \right\}.$$

Differentiieren wir nach der Zeit, so ist die Abnahme der Spannung in der Zeiteinheit

$$\frac{dM}{dt} = -\frac{\vartheta_0 J_p}{l} \psi(t)$$

Man hat also eine langsam aufhörende Relaxation. Ist $\int_0^\infty \psi(\omega)d\omega = G'$, so wird $G - G'$ der „endgültige Grenzwert" des Gleitmoduls und $\frac{(G - G')J_p}{l} \vartheta_0$ der Endwert des Moments.

Es ist besonders interessant, daß man durch den Boltzmannschen Ansatz auch zu einer Theorie der gedämpften Schwingungen gelangt, die wir in Punkt VI 1 auf Grund der Vorstellung der inneren Reibung behandelt haben. Boltzmann gelangt zu dem Schlusse, daß, falls man wahrscheinliche Annahmen für die Erinnerungsfunktion macht, das logarithmische Dekrement unabhängig wird von der Schwingungsdauer. Dies trifft namentlich nach Beobachtungen von Streintz und Voigt bei vielen Körpern (z. B. Gußeisen, Cadmium) in der Tat zu; allerdings gibt es viele Körper, die ein entgegengesetztes Verhalten zeigen.

Die Boltzmannsche Theorie wurde von Wiechert wesentlich erweitert, indem er durch Superposition mehrerer Exponentialglieder für die Erinnerungsfunktion zeigte, daß die Theorie den Versuchsresultaten sehr gut angepaßt werden kann.

4. Schlußbemerkungen. Die obige Darstellung der wichtigsten Nachwirkungserscheinungen gibt ohne Zweifel nur ein etwas schematisiertes Bild der Vorgänge, und es gibt eine große Fülle von Tatsachen, die heute noch kaum vollständig systematisch zusammengefaßt werden können. Es wäre noch z. B. der Einfluß von wiederholten Belastungen zu erwähnen: die Tatsache der sogenannten elastischen Ermüdung. Sie besteht darin, daß durch langdauernde Hin- und Herschwingungen des Körpers die Dämpfung der Schwingungen zeitlich zunimmt: man sagt, der Körper wird ermüdet. Dieser Beobachtung steht gewissermaßen die Beobachtung von Streintz gegenüber, daß wiederholte Schwingungen in vielen Fällen eine Abnahme des logarithmischen Dekrements zur Folge haben, also gerade keine Ermüdung, sondern Akkommodation hervorrufen. Es hat sich aber gezeigt, daß die Akkommodation keine spezielle Folge der Belastungsänderung ist, sondern sie erfolgt immer, falls der Körper längere Zeit belastet wird. Andererseits ist es wahrscheinlich, daß die Ermüdung eigentlich schon zu jenen Vorgängen gehört, die die innere Konstitution des Körpers ändern und folglich in die Festigkeitslehre gehören (siehe den Artikel „Festigkeit"). Der Unterschied zwischen solchen Vorgängen und den Vorgängen der elastischen Nachwirkung in engerem Sinne besteht darin, daß die ersteren die Eigenschaften des Körpers sozusagen in nicht umkehrbarer Weise ändern, während die Hysteresis und Nachwirkungserscheinungen, wenn sie auch irreversible Vorgänge sind, die Konstitution des Körpers eigentlich nicht beeinträchtigen, da ein früherer Zustand auf irgendeinem Umwege immer wieder zu erreichen ist.

Wie auch aus dieser kurzen Darstellung erhellt, liefern die Boltzmannsche Theorie und die daran anschließenden Untersuchungen ohne Zweifel nur formale Ansätze zur Beschreibung sehr komplizierter molekularer Vorgänge. Eine Erklärung der Tatsachen ist vielleicht von der kinetischen Theorie des festen Körpers zu erwarten, wie die Viskosität von Gasen von der kinetischen Theorie aus eine zwanglose Erklärung fand. Nur liegen die Verhältnisse bei festen Körpern so viel komplizierter, daß es zunächst fraglich erscheint, ob wir in kurzer Zeit eine Einsicht in den komplizierten Mechanismus gewinnen werden.

Literatur. *I. Lehrbücher:* ***C. L. Navier***, *Résumé des leçons sur l'application de la mécanique, 3. Aufl., 1826, herausgeg. von St. Venant, Paris 1864.* — ***G. Lamé***, *Leçons sur la théorie mathématique de l'élasticité des*

Digitized by Google

corps solides, Paris 1852, 2. Aufl. 1866. — **A. Clebsch,** *Theorie der Elastizität fester Körper, Leipzig 1862, französisch von St. Venant und Flamant, Paris 1883.* — **F. Neumann,** *Vorlesungen über die Theorie der Elastizität, Leipzig 1885.* — **G. Kirchhoff,** *Vorlesungen über math. Physik: Mechanik, Leipzig 1876, 4. Aufl. 1897.* — **H. v. Helmholtz,** *Vorlesungen über math. Physik, Bd. II, Leipzig 1902.* — **Thomson und Tait,** *Treatise on natural philosophy, Oxford 1867, neuester Abdruck 1896.* — **H. Poincaré,** *Leçons sur la théorie de l'élasticité, Paris 1891.* — **A. E. H. Love,** *A treatise on the mathematical theory of elasticity, Cambridge 1892/93, 2. Aufl. 1906, deutsch von A. Timpe, Leipzig 1907.* — **C. Bach,** *Elastizität und Festigkeit, Berlin 1890, 6. Aufl. 1911.*

II. Referate (Historisches): **W. Thomson,** *„Elasticity" in Encyclopaedia Britannica, 9. Aufl. 1878.* — **F. Auerbach,** *Elastizität im Handbuch der Physik, 1908.* — **C. H. Müller und A. Timpe, O. Tedone, O. Tedone und A. Timpe,** *Encyklopädie der math. Wissenschaften, IV, 23, 24, 25, 1907 bis 1908.* — **J. Todhunter und K. Pearson,** *A history of the theory of elasticity and of the strength of materials, Cambridge 1886 bis 1893.*

Th. v. Kármán.

Elektrizität.

1. Einleitender Abschnitt: a) Entstehung von Elektrizität bei Reibung; + und — Elektrizität; Gesetz von der Erhaltung der Elektrizität. b) Theorie der Fluida. c) Fernwirkung; Nahewirkung. 2. Elektrizität und Materie: a) Elektrizität als Verknüpfung von Aether und Materie. b) Begriff und Einheit der Elektrizitätsmenge. Elektrotechnisches und praktisches Maß. 3. Ionen und Elektronen: a) Atomare Struktur von Elektrizität und Materie. Elektrolytische Ionen. Elementarquantum der Elektrizität. b) Die spezifische Ladung eines Ions. c) Die Ionen in Gasen. d) Die elektrische Ladung der α-Strahlteilchen. e) Kathodenstrahlen. Das Elektron. 4. Elektronentheorie der Materie: a) Elektromagnetischer Charakter der trägen Masse. b) Dielektrische Polarisation. c) Einfluß der Elektronen auf optische Vorgänge in der Materie. d) Elektrizitätsleitung. e) Abgabe freier Elektrizität bei Erhitzung und Bestrahlung. f) Statische Verteilung der Elektrizität. Influenz-Elektrizität von Leitern und Isolatoren. g) Osmotische Theorie der Ionen und Elektronen. Berührungs-, Thermo-, Reibungs-Elektrizität[1]).

1. Einleitender Abschnitt. 1a) Entstehung von Elektrizität bei Reibung; + und — Elektrizität; Gesetz von der Erhaltung der Elektrizität. Der Name Elektrizität stammt von der im Altertum bereits bekannten Eigentümlichkeit des Bernsteins (ἤλεκτρον), gerieben leichte Teilchen anzuziehen. Die Eigenschaft bei Reibung mit anderen Stoffen eine elektrische Ladung anzunehmen, welcher jene anziehende Kraft zuzuschreiben ist, zeigen alle Substanzen. Das scheinbar abweichende, sogenannte anelektrische Verhalten von Metallen und manchen anderen Körpern wurde von Gray 1727 dadurch erklärt, daß dieselben ein Leitungsvermögen für Elektrizität besitzen. Solche Körper, sogenannte Leiter, sind isoliert aufzustellen, wenn sie bei Reibung eine elektrische Ladung annehmen und behalten sollen. Durch Bestreichen eines auf isolierendem Fuß stehenden Leiters, etwa einer Metallkugel, mit einem durch Reibung elektrisierten Isolator, kann durch Leitung Elektrizität auf ihn übertragen werden. Dufay machte 1734 die Entdeckung der beiden Elektrizitätsarten, der positiven und negativen Elektrizität. Mit gleichartiger Elektrizität geladene Körper stoßen sich ab, ungleichartig geladene ziehen sich an. Glas wird durch Reiben mit Seidenzeug oder amalgambestrichenem Leder positiv, Hartgummi, Schellack durch Reiben mit Pelzwerk negativ elektrisch. Das Gesetz von der Erhaltung der Elektrizität sagt aus, daß bei jeder Erzeugung von Elektrizität stets beide Arten von Elektrizität in gleicher Menge entstehen; im Falle der Erzeugung durch Reibung zeigen reibender und geriebener Körper immer Elektrizität entgegengesetzten Vorzeichens. Es findet demnach keine eigentliche Erzeugung von Elektrizität, sondern nur eine Trennung entgegengesetzter Elektrizität bei dem Reibungsvorgang statt. Gleiche Quanten entgegengesetzter Elektrizität kompensieren sich und ergeben zusammen einen ungeladenen Zustand.

1b) Theorie der Fluida. Die naheliegendste Hypothese über die Natur des elektrischen Zustandes ist die Annahme der Existenz zweier elektrischer Fluida, von denen ein unelektrischer Körper gleiche Mengen enthält. Bei jedem elektrisierenden Vorgang, wie z. B. bei der Reibung zweier verschiedener Körper, findet eine Trennung der Fluida durch Strömen derselben statt. Nicht wesentlich verschieden von dieser dualistischen Theorie ist die Annahme eines einzigen Fluidums, welche von Franklin vorgeschlagen wurde. Nach dieser unitarischen Theorie soll jeder Körper im neutralen Zustande ein gewisses Normalquantum an Fluidum enthalten. Ueberschuß und Mangel an demselben soll die Erscheinungen der Ladung mit entgegengesetztem Vorzeichen hervorrufen.

1c) Fernwirkung und Nahewirkung. Dem elektrischen Fluidum war die besondere Eigentümlichkeit zuzuschreiben, nach außen

[1]) Dieser Artikel gibt eine allgemeine Einführung in das Verständnis der elektrischen Erscheinungen, die ausführlich in den besonderen elektrischen Artikeln behandelt werden.

Digitized by Google

eine bewegende Kraft auszuüben. Die quantitativen Untersuchungen Coulombs über die Größe dieser Kraft ergaben eine große formale Aehnlichkeit mit der Gravitationswirkung der Massen. Wie diese Wirkung, so sah man darum auch die der Elektrizität als eine unvermittelte Fernwirkung, als eine „actio in distans" an, obwohl dem Entdecker der Gravitation selbst, Newton, das Unbefriedigende, das in der Annahme einer durch den einflußlosen Raum erfolgenden Wirkung lag, nicht entgangen war. Eine der glänzendsten Errungenschaften des menschlichen Forschergeistes war die von England ausgehende Lossage von der Fernwirkungstheorie. Faraday war der erste, welcher sich eine neue vollkommen andersartige Vorstellung von dem Wesen der elektrischen Kraftwirkung bildete. Das Wesentliche an der Faradayschen Anschauung im Gegensatz zu der Annahme reiner Fernwirkung ist, daß dem zwischen den Ladungen befindlichen Medium eine wichtige Rolle zuerteilt wird. Auf dem Boden dieser Nahewirkungstheorie stehend, machte Faraday eine große Reihe der glänzendsten Entdeckungen. Trotzdem drang er mit ihr lange Zeit nicht durch, wohl hauptsächlich deswegen, weil er mit seiner Theorie in einem völligen Gegensatz zu der Anschauung der größten Autoritäten auf dem Gebiete der Elektrizitätslehre sich befand, auch wohl, weil seine Abhandlungen in einer schwer verständlichen Ausdrucksweise geschrieben waren. Erst James Clerk Maxwell brachte Faradays geniale Ideen in streng mathematische Form und verhalf ihnen zu glänzendem Siege.

2. Elektrizität und Materie. 2a) Elektrizität als Verknüpfung von Aether und Materie. Nach der Faraday-Maxwellschen Anschauungsweise ist ein geladener Körper von einem elektrischen Feld umgeben, dessen Träger das Vakuum, der leere Raum ist, dem man als physikalischem Objekt auch den Namen Weltäther beigelegt hat. Bestehen eines elektrischen Feldes bedeutet, daß der Aether sich in einem besonderen Spannungszustand befindet. Weil es keine Substanz gibt, in welcher ein elektrisches Feld nicht existieren könnte, so hat man den Weltäther als jede Materie durchdringend anzusehen. Cavendish und etwa 60 Jahre später Faraday entdeckten den Einfluß von Isolatoren auf die elektrischen Erscheinungen, der als eine Wirkung der Materie auf den elektrisch gespannten Aether aufzufassen ist. Wenn zwar auch ein elektrisches Feld in dem von wägbarer Materie freien, leeren Raum bestehen kann, so hat die Materie doch stets den wichtigen Anteil an den elektrischen Erscheinungen, daß diese letzteren stets nur mit ihrer Vermittelung wahrgenommen werden können, und daß ferner sich nur auf ihr der Sitz der felderregenden Ladung befindet. Das Vakuum ist nach allen unseren Erfahrungen niemals Träger elektrischer Ladungen. Nur mit greifbarer Materie kann Elektrizität verbunden sein. In der graphischen Darstellung des elektrischen Feldes durch Kraftlinien bedeutet dies, daß nur von ponderablen, materiellen Teilchen Kraftlinien ausgehen, nur an solchen sich freie Enden von Kraftlinien befinden können.

Da die Materie nur im geladenen Zustand ein wahrnehmbares elektrisches Feld in ihrer Umgebung hervorruft, ferner ein elektrisches Feld erfahrungsgemäß auf materielle Körper nur dann eine bewegende Kraft ausübt, wenn diese geladen sind, so hat man die elektrische Ladung als das Bindemittel zwischen Aether und Materie anzusehen.

Die Faraday-Maxwellsche Theorie hatte hervorragende Erfolge in der Aetherphysik. Die Materie, insbesondere die leitende, spielte in ihr jedoch mehr die Rolle eines Störenfrieds. Der Leiter weigert sich, ein elektrisches Feld im Gleichgewicht in sich zu beherbergen, der Isolator beeinflußt die elektrischen Erscheinungen in einer Weise, die formal durch die von Faraday eingeführte Dielektrizitätskonstante in der Theorie wiedergegeben wurde. Der Begriff Elektrizität oder elektrische Ladung wurde, da das Hauptaugenmerk auf den Aether gerichtet war, man kann fast sagen diskreditiert und durch den Ausdruck „freie Enden von Kraftlinien" ersetzt. Die Aethertheorie sagte nichts aus, und konnte nichts aussagen, überall wo ein spezieller Einfluß der Materie vorhanden war, wo es sich um elektrische Erscheinungen in wägbaren Körpern handelte (Einfluß von Isolator und Leiter auf die elektrischen und optischen Vorgänge, Elektrolyse, Thermoelektrizität u. a. m.). Hier mußten neue Hypothesen, an Fundamentalversuche anschließend, eingreifen, die ein bestimmtes Bild von der Konstitution der Materie entwerfen.

2b) Begriff und Einheit der Elektrizitätsmenge. Elektrostatisches und praktisches Maß. Mit Hilfe der Drehwage stellte Coulomb für die zwischen zwei Ladungen wirkende Kraft das nach ihm benannte Gesetz auf. Die Kraft, welche eine geladene Kugel auf eine außerhalb befindliche Ladung ausübt, wird auf die Hälfte reduziert, wenn man der Kugel durch Berühren mit einer zweiten gleichen die Hälfte ihrer Ladung entzieht. Es ist darum die Kraft zwischen zwei geladenen Kugeln der Ladung jeder derselben proportional, außerdem ist ferner die Kraft mit dem Quadrat

Digitized by Google

der Entfernung r der Kugelmittelpunkte abnehmend.

$$\text{Kraft} = \text{Konstans} . \frac{ee'}{r^2} .$$

In diesem Coulombschen Gesetz ist die Ladung oder Elektrizitätsmenge e eine noch undefinierte Größe. Eine bestimmte Festsetzung ihrer Einheit und eine mechanistische Definition erhält man, wenn man für die Konstante eine bestimmte Festsetzung trifft. Die Grundlage des mechanischen, sogenannten elektrostatischen Maßsystems und eine mechanische Definition für die Einheit der Elektrizitätsmenge in diesem Maßsystem gewinnt man durch die willkürliche Maßnahme, für die Konstante die Zahl Eins zu setzen. Dann wird nämlich für $e = e' = 1$ und $r = 1$ auch Kraft $= 1$, d. h.

Die Elektrizitätsmenge 1 elektrostatische (e. s.) Einheit stößt eine ihr gleiche in 1 cm Entfernung mit der Krafteinheit 1 Dyne ab.

Die absolute Krafteinheit 1 Dyne ist ungefähr der Kraft gleich, mit welcher ein Milligramm von der Erde angezogen wird.

Die so definierte Einheit der Ladung und das auf ihr sich aufbauende elektrostatische Maßsystem sind praktisch nur mehr von untergeordneter Bedeutung. In der technischen Praxis ist eine andere, wesentlich größere Einheit festgelegt und für die Definition der technischen Einheit, des Coulomb, die von Faraday entdeckte Tatsache verwendet worden, daß bei der Elektrolyse von Metallsalzlösungen dem Durchgang einer bestimmten Elektrizitätsmenge durch die Zersetzungszelle immer die Ausscheidung einer ganz bestimmten Menge eines Metalls entspricht. Ein Coulomb ist die Elektrizitätsmenge genannt worden, welche aus einer Silbersalzlösung 0,001118 g Silber ausscheidet. Es ist 1 Coulomb $= 3 . 10^9$ elektrostatischen Einheiten. Wird beim Strömen von Elektrizität die Menge 1 Coulomb in der Sekunde durch den Querschnitt des Leiters befördert, so fließt in diesem der Strom 1 Ampère (vgl. den Artikel „Elektrische Maßnormale").

3. Ionen und Elektronen. 3a) Atomare Struktur von Elektrizität und Materie. Elektrolytische Ionen. Elementarquantum der Elektrizität. Die Fundamentalgesetze der Elektrolyse, an welche die neuen Hypothesen über die Konstitution von Elektrizität und Materie anschlossen, sind auch von Faraday in einer Reihe glänzender Experimentaluntersuchungen festgestellt worden. Von Clausius, später insbesondere von Sv. Arrhenius, sowie von van t'Hoff und Nernst bis in alle Einzelheiten theoretisch verfolgt, sind die elektrolytischen Erscheinungen von entscheidendstem Einfluß für die Erkenntnis der Beziehungen zwischen Elektrizität und Materie geworden. Die Tatsache, daß das Passieren einer bestimmten Elektrizitätsmenge durch einen Elektrolyten stets von einem ganz bestimmten Zersetzungseffekt begleitet ist, der in verschiedenen Elektrolyten die Ausscheidung chemisch äquivalenter Mengen bedingt, führte zu der Clausiusschen Theorie der Ionenwanderung. Der Elektrizitätstransport geschieht nach ihr durch die Bewegung der positiv und negativ geladenen Ionen, in welche die gelösten Moleküle gespalten sind. Die von Arrhenius ausgebaute Dissoziationstheorie baut sich auf dem Grundgedanken auf, daß die Spaltung der Moleküle und Atome des Elektrolyten in Ionen unabhängig von Stromwirkungen bereits in der Lösung vor sich geht. Der Ausscheidung eines Grammäquivalents eines Ions entspricht dem elektrolytischen Grundgesetz zufolge der Durchgang einer bestimmten, von der Natur des Ions unabhängigen Elektrizitätsmenge. Es ist die an einem Grammäquivalent (= Atomgewicht: Wertigkeit) haftende sogenannte Aequivalentladung. Die Aequivalentladung ist eine von der Natur der Substanz unabhängige sogenannte universelle Konstante und beträgt 96540 Coulomb. Diese Elektrizitätsmenge haftet also an den Ionen von z. B. 1 gr Wasserstoff, 107,9 g Silber, $\frac{16}{2} = 8$ g Sauerstoff, $\frac{63,6}{2} =$ 31,8 g Kupfer, $\frac{14}{3} = 4,67$ g Stickstoff usw.

Um die Elektrizitätsmenge zu erhalten welche an einem einzelnen einwertigen Ion haftet, hat man die Ladung 96 540 Coulomb nur zu dividieren durch die Anzahl von Ionen, die im Grammäquivalent enthalten sind. Ein Grammäquivalent Wasserstoff, d. i. ein Gramm nimmt nun bei 0° Celsius und dem Normaldruck von 760 mm Quecksilber ein Volumen von 10830 ccm ein. Die Anzahl von Gasmolekülen, welche unter diesen Bedingungen in einem ccm enthalten und für alle Gase nach der Avogadroschen Regel die gleiche ist, ist als die sogenannte Loschmidtsche Zahl angenähert bekannt, sie beträgt $N = 2,8 . 10^{19}$. Jedes Wasserstoffmolekül enthält zwei Atome, welche positiv geladen je ein Wasserstoffion bilden; es sind darum im Grammäquivalent Wasserstoff $2 . 10830 . 2,8 . 10^{19}$ d. h. $60648 . 10^{19}$ Ionen enthalten. An einem Wasserstoffion haftet demnach die Ladung $\frac{96540}{60648 . 10^{19}} =$ $1,59 . 10^{-19}$ Coulomb. Die gleiche Ladung haftet an jedem anderen einwertigen Ion, sowie an jeder Wertigkeit der mehrwertigen Ionen. Ein zweiwertiges Ion trägt demnach

Digitized by Google

die doppelte, ein dreiwertiges die dreifache usw. Elektrizitätsmenge.

Es ist bisher auf keine Weise gelungen, mit Sicherheit kleinere Elektrizitätsmengen als diese am einwertigen Ion haftende Ladung nachzuweisen. Gegenteilige Beobachtungen sind widerlegt worden und höchst wahrscheinlich auf Fehler zurückzuführen. Dagegen hat man auf mehreren ganz anderen Gebieten dieselbe kleinste Ladung feststellen können. Man hat darum diese Elektrizitätsmenge das Elementarquantum der Elektrizität genannt und ist zu der Ansicht gelangt, daß es kleinere Quanten von Elektrizität überhaupt nicht gibt. Wie der Materie, so weist man also auch der Elektrizität eine atomare Struktur zu. Die Elementarquanten der Elektrizität haften im allgemeinen an den Atomen der Materie, immer eines an jeder chemischen Wertigkeit des Atoms. Als Mittelwert für das Elementarquantum der Elektrizität gilt augenblicklich der Wert $1{,}56 . 10^{-19}$ Coulomb.

3b) Die spezifische Ladung eines Ions. So wird die mit der Masseneinheit des Ions verbundene Ladung, also der Quotient $\frac{e}{m}$ aus Ladung und Masse des Ions genannt. Sie hat unter allen chemischen Ionen für das des Wasserstoffs, weil es das leichteste ist, den größten Wert 96540 $\frac{\text{Coulomb}}{\text{Gramm}}$. Für das 108mal schwerere Silberion ist die spezifische Ladung 108mal kleiner. Sie ist der reziproke Wert der die Ladung 1 Coulomb tragenden Menge, welche man das elektrochemische Aequivalent nennt.

3c) Die Ionen in Gasen. Das Leitungsvermögen, welches Gase unter gewissen Bedingungen zeigen, wird, wie das der Elektrolyte, durch eine Dissoziation, eine Spaltung der Gasmoleküle in Ionen erklärt. Kräftige elektrische Felder, Erhitzung, Röntgenstrahlen, die Strahlen radioaktiver Substanzen, ultraviolettes Licht u. a. m. sind imstande, Gase partiell zu ionisieren. Die Eigenschaft der Gasionen Kondensationskerne für Wasserdampf zu bilden, ist von J. J. Thomson zu einer Bestimmung der an ihnen haftenden Elektrizitätsmenge verwandt worden. Bei Abkühlung einer mit Wasserdampf gesättigten, abgeschlossenen Gasmasse durch eine plötzliche Expansion tritt keine Nebelbildung ein, wenn das Gas staubfrei ist. Wenn Staubteilchen zugegen sind, findet aber Kondensation statt, derart daß sich um jedes Teilchen ein Nebelbläschen bildet. Wie Staubteilchen wirken auch die Ionen, die man in dem Gase erzeugt. Durch eine Messung der Ladung, die eine so hergestellte Nebelwolke bei ihrem Niedersenken auf eine Metallplatte übertrug, kombiniert mit einer Zählung der in ihr enthaltenen Nebelbläschen, konnte Thomson die Ladung eines Bläschens, also die mit einem Ion verbundene Elektrizitätsmenge, direkt bestimmen. Der von ihm gefundene Betrag 10^{-19} Coulomb ist in der Größenordnung in guter Uebereinstimmung mit dem aus elektrochemischen Messungen erhaltenen Wert des Elementarquantums. Die Methode ist von H. A. Wilson wesentlich dadurch verbessert worden, daß die schwierige Zählung der Nebelbläschen (Wägung der gesamten Nebelmenge und Bestimmung der Masse eines Nebelteilchens aus der Fallgeschwindigkeit) vermieden und durch eine Beobachtung der Fallgeschwindigkeitsänderung in einem vertikalen elektrischen Feld ersetzt wurde. Weitere Messungen nach der Wilsonschen Methode sind in neuester Zeit von F. Ehrenhaft und von R. A. Millikan ausgeführt worden. Den Angaben des ersteren, Ladungswerte gefunden zu haben, die kleiner als das Elementarquantum sind, wird von Millikan sowie von E. Regener entgegengetreten.

3d) Die elektrische Ladung der α-Strahlteilchen. Die α-Strahlen radioaktiver Substanzen sind als außerordentlich schnell bewegte positiv geladene Heliumatome erkannt worden, die bei den atomaren Umwandlungsprozessen von der aktiven Materie ausgeschleudert werden. Auch an ihnen ist es gelungen, die Größe der Ladung des Atoms festzustellen. Trifft ein α-Strahlteilchen auf einen Zinkblendeschirm, so löst es auf diesem einen Lichtblitz aus. In der Nähe eines α-strahlenden radioaktiven Präparats zeigt ein solcher Schirm daher eine Flimmererscheinung. Von E. Regener wurde durch Zählen der Szintillationen die in der Zeiteinheit ausgesandte Zahl von α-Teilchen eines Präparats bestimmt, gleichzeitig an demselben Präparat im luftleeren Raum die von ihm emittierte Ladung ermittelt. Die Kombination beider Messungen ergab als Ladung eines α-Teilchens den Betrag von $3{,}2 . 10^{-19}$ Coulomb. Nach einer anderen, elektrischen Methode wurde die Zählung von Rutherford und Geiger ausgeführt und für die Ladung der fast gleiche Wert $3{,}1 . 10^{-19}$ Coulomb gefunden. Das Heliumatom eines α-Strahls ist hiernach mit zwei Elementarquanten geladen, und für das Elementarquantum der Elektrizität ergibt sich als Mittel der beiden genannten Bestimmungen der Wert $1{,}57 . 10^{-19}$ Coulomb.

3e) Kathodenstrahlen. Das Elektron. Neues Licht für die Erkenntnis in den Beziehungen zwischen Elektrizität und Materie strahlte von der Vakuumröhre aus. Die von der negativen Elektrode einer in verdünntem Gase stattfindenden elektrischen

Digitized by Google

Entladung ausgehenden Kathodenstrahlen sind bereits seit geraumer Zeit durch ihre Eigenschaften, ganz insbesondere ihre magnetische und elektrische Ablenkbarkeit, als sehr schnell bewegte, negativ geladene Teilchen erkannt worden. Die quantitative Bestimmung ihres Verhaltens im elektrischen und magnetischen Felde hat es gestattet, die spezifische Ladung $\frac{e}{m}$ der Teilchen recht genau zu ermitteln. Sie hat im Mittel aus den neueren Messungen den Wert $\frac{e}{m} = 1{,}75 . 10^7 \frac{\text{Coulomb}}{\text{Gramm}}$, ist also rund 1800 mal größer als der größte am chemischen Atom, nämlich dem Wasserstoffatom, vorkommende Wert. Macht man für das Kathodenstrahlteilchen die naheliegendste Voraussetzung, daß es die Ladung eines einwertigen Ions, d. h. die einfache Elementarladung trägt, so folgt, daß seine Masse noch 1800 mal kleiner als diejenige des leichtesten chemischen Atoms, des Wasserstoffions, ist. Man hat diesen Teilchen, die in der Folge an vielen anderen Stellen wiedergefunden worden sind und einen ganz universellen Charakter haben, den Namen Elektronen gegeben.

Elektronen werden als sogenannte β- und δ-Strahlen bei vielen radioaktiven Prozessen von der Materie ausgesandt. Während sie als Kathodenstrahlen Geschwindigkeiten von im Mittel etwa $^1/_5$ Lichtgeschwindigkeit haben, kommen sie als β-Strahlen fast diesem Werte selbst nahe.

4. Elektronentheorie der Materie. 4a) Elektromagnetischer Charakter der trägen Masse. Die sehr genauen W. Kaufmannschen Messungen der spezifischen Ladung des Elektrons an verschieden schnellen β-Strahlen ergaben das zunächst recht auffällige Resultat einer Abhängigkeit dieser Größe von der Geschwindigkeit des Elektrons. Da das Elementarquantum der Elektrizität als eine Naturkonstante angesehen werden muß, so folgte hieraus eine Veränderlichkeit, und zwar eine starke Zunahme der trägen Masse mit der Schnelligkeit der Bewegung. Die Theorie gab hierfür bald die Erklärung. Ein bewegtes geladenes Teilchen entspricht einem elektrischen Strom, und dieser repräsentiert wiederum einen gewissen mit der Geschwindigkeit zunehmenden Betrag elektromagnetischer Energie. Damit ein geladenes Teilchen beschleunigt wird, ist daher eine Zufuhr von Energie notwendig, ebenso wie Arbeit für eine Geschwindigkeitsvermehrung eines Masseteilchens aufgewendet werden muß. Darum erscheint die Trägheit eines Massenteilchens vergrößert, wenn es geladen ist, und zwar um einen Betrag, den man als elektromagnetische Trägheit oder Masse bezeichnet. Die theoretische Berechnung dieser Größe auf Grundlage der Maxwellschen Theorie ergibt nun, daß dieselbe bis zu Geschwindigkeiten von der Größenordnung derjenigen der Kathodenstrahlen einen konstanten Wert besitzt, daß aber von dort an mit wachsenden Geschwindigkeiten ihr Wert schnell zunimmt, um bei Annäherung an die Lichtgeschwindigkeit selbst unendlich groß zu werden. Das genauere Gesetz über die Art dieser Zunahme hängt ab von den Annahmen, die man über die Gestalt des bewegten Elektrons macht. Für die Annahme einer Kugelform des Elektrons (ursprüngliche Abrahamsche Theorie) ergibt sich eine etwas andere Veränderlichkeit der trägen Masse mit der Geschwindigkeit als bei der Annahme der Gestalt, welche die Relativitätstheorie für das bewegte Elektron vorschreibt. Ferner hat nach beiden Theorien die Trägheit eine verschiedene Veränderlichkeit, je nachdem die Beschleunigung in der Bewegungsrichtung oder senkrecht zu derselben erfolgt. Es ist darum eine longitudinale von einer transversalen Masse zu unterscheiden.

Wenn auch die genaue Entscheidung darüber, welche Form das bewegte Elektron hat, noch aussteht, und es genauesten Präzisionsmessungen noch vorbehalten bleiben muß, über die Relativitätstheorie ein definitives Wort zu ermöglichen, so ist aus den vorhandenen Beobachtungen doch bereits Antwort auf folgende Frage von eminenter Wichtigkeit zu holen: Hat das Elektron überhaupt noch andere träge Masse oder ist seine gesamte Trägheit elektromagnetischen Ursprungs? Der nahe Anschluß der Beobachtungen an die Theorie läßt kaum einen Zweifel mehr, daß das letztere der Fall ist. Wir haben mit allergrößter Wahrscheinlichkeit, man kann fast sagen mit Sicherheit, in den Elektronen diskrete Teilchen vor uns, deren gesamte Trägheit nur durch ihre Ladung veranlaßt wird. Ihre träge Masse ist eine rein durch die elektromagnetische Wirkung ihrer Elektrizität hervorgerufene Eigenschaft. Es ist kein großer Schritt mehr zu der weitreichenden Frage: Ist die Trägheit der Materie überhaupt eine rein elektromagnetische Erscheinung? Eine Fülle von Tatsachen spricht für die Bejahung dieser Frage. Ueberall, wo die Materie auf physikalische Erscheinungen von Einfluß ist, können wir die Wirkung der Elektronen bereits bemerken. Offenbar haben wir in diesen elementaren Gebilden die universellen Bausteine der Materie zu erblicken, und wir können die Identität von Elektrizität und Materie vorausahnen. Wenn wir also zuerst behauptet haben, die Elektrizität sei notwendig an Materie gebunden, so geht die Elektronentheorie der Materie einen großen Schritt

Digitized by Google

weiter und behauptet: Elektrizität ist Materie. Es besteht hiernach zwischen Aether und Materie nicht mehr ein fundamentaler Unterschied, sondern die Materie ist Aether, freilich in einer ganz besonders modifizierten Form. Elektronen, die Bausteine der Materie, sind singuläre Punkte im elektrisch erregten Raum. Aufgabe der Forschung ist es festzustellen, wie sich die einzelnen chemischen Atome aus den Elektronen aufbauen. Dies ist zur Zeit noch ebenso unbekannt wie die eigentümliche Eigenschaft der Materie, die Gravitationskraft auszuüben. Nur eine Einführung besonderer neuer Hypothesen dürfte hier weitere Aufklärung versprechen.

Die nach außen ungeladen erscheinende Materie enthält außer den negativen Elektronen den gleichen Betrag positiver Ladung. Ueberschuß an Elektronen läßt sie in der Umgebung als negativ geladen erscheinen, Mangel an solchen als positiv. Die interatomaren elektrischen Felder sind es, die einer Beschleunigung widerstrebend die Trägheit der Materie veranlassen. Ein positives chemisches Ion, sogenanntes Kation, z. B. ein Metallion, ist ein Atom, von welchem je nach seiner Wertigkeit ein, zwei, drei usw. Elektronen abgespalten sind, ein negatives Ion wird durch ein Atom oder einen Atomkomplex gebildet, in dem ein oder mehrere Elektronen im Ueberschuß enthalten sind. Das gleiche gilt von den Ionen leitender Gase. Positive Elementarquanten in Freiheit als positive Elektronen sind bisher nicht beobachtet worden, sie sind stets ionenbildend an Atome oder Komplexe solcher gebunden. Dies gilt in gleicher Weise von den positiven Teilchen der Elektrolyse wie von denen, welche als Kanal-, Anoden- oder α-Strahlen auftreten. Messungen der spezifischen Ladung aus der Strahlenablenkung im elektrischen und magnetischen Feld haben die ersteren beiden Strahlenarten als + geladene Gas- oder Metallatome, die α-Strahlen als + geladene Heliumatome erkennen lassen.

4b) Die dielektrische Polarisation. In den ungeladenen Atomen der Materie hat man die Elektronen und positiven Kerne in gewissen Gruppierungen Gleichgewichtsstellungen einnehmend zu denken. Jede Verschiebung derselben muß quasielastische elektrische Gegenkräfte hervorrufen. Wird ein wägbarer Körper einem elektrischen Feld ausgesetzt, so wirkt dieses so lange auf die geladenen Partikel verschiebend ein, bis die Gegenkraft der verschiebenden Kraft gleich geworden ist. Dies ist die Faraday-Maxwellsche Verschiebung oder Polarisation im Dielektrikum (vgl. den Artikel „Dielektrizität").

4c) Einfluß der Elektronen auf optische Vorgänge in der Materie. Elektronen und positive Kerne sind, da sie durch Kräfte in ihrer Gleichgewichtslage im Atom gehalten werden, schwingungsfähige Gebilde. Die Frequenz ihrer Eigenschwingungen hat die Größenordnung optischer Schwingungszahlen, und zwar ist die Frequenz der positiven Kerne diejenige von Wärmestrahlen, die Schwingungszahl der viel leichteren Elektronen ist sehr viel größer, entspricht nämlich im allgemeinen den Frequenzen des sichtbaren und des ultravioletten Lichts. Sie ist in verschiedenen Stoffen verschieden groß, weil die Stärke der Bindung im Atom als von dessen Natur abhängig anzusehen ist. Die elektromagnetischen Kräfte in einem Lichtstrahl bringen die geladenen Teilchen der Materie, in welcher der Strahl verläuft, zum Mitschwingen (vgl. den Artikel „Schwingungen, Erzwungene Schwingungen"). Die Folge hiervon ist eine Aenderung der Fortpflanzungsgeschwindigkeit und damit eine Brechung des Strahls, deren Stärke mit der Frequenz seiner Schwingungen veränderlich ist (Dispersion). Dieser Einfluß der Materie ist von abnormer Stärke in den Resonanzgebieten, d. h. für Frequenzen des Strahls, die mit einer Eigenfrequenz der Materie übereinstimmen (anomale Dispersion und Absorption). Die schwingenden Teilchen werden als bewegte Ladungen, wie die Kathoden- und Kanalstrahlen, von einem Magnetfeld beeinflußt. Für einen Lichtstrahl, der in Richtung der magnetischen Feldlinien verläuft, resultiert hieraus die von Faraday entdeckte Drehung der Polarisationsebene, für einen senkrecht zum Feld gerichteten Strahl eine im allgemeinen allerdings kaum wahrnehmbare magnetische Doppelbrechung der Materie. Auch diese beiden Erscheinungen sind mit der Wellenlänge des Lichtstrahls veränderlich und nehmen einen anomalen Charakter in Resonanzgebieten an. Im Natriumdampf sind am Absorptionsstreifen Drehungen bis zu 270° und kräftige Doppelbrechung beobachtet worden (Macaluso und Corbino, W. Voigt).

Auf dem gleichen Einfluß eines Magnetfeldes auf die schwingenden Elektronen beruht das auch bereits von Faraday, mit den damaligen optischen Hilfsmitteln indessen vergeblich, aufgesuchte Lorentz-Zeemansche Phänomen. Die experimentelle Auffindung dieser Erscheinung durch Zeeman war deswegen für die Entwickelung der Elektronentheorie so hoch bedeutsam, weil hier zum ersten Male auf einem völlig neuen Wege eine quantitative Bestimmung der spezifischen Ladung $\frac{e}{m}$ des Licht emittierenden Teilchens gegeben wurde. Die Identität dieser Ladung an Vorzeichen und

Digitized by Google

Größe mit dem Kathodenstrahlwerte bewies, daß das Elektron das Zentrum der Lichtemission ist (vgl. den Artikel „Magnetooptik").

4d) Elektrizitätsleitung. In Elektrolyten ist die Elektrizitätsleitung nur durch die Wanderung von Ionen, d. h. von Atomen oder Atomkomplexen mit angelagerten oder abgespaltenen Elektronen, veranlaßt. Freie Elektronen kommen in ihnen nicht vor. Dasselbe gilt im allgemeinen von Gasen normaler und größerer Dichtigkeit. In verdünnten Gasen, mag die Dichteerniedrigung durch Verminderung des Drucks (Vakuumröhren) oder Erhöhung der Temperatur (Flamme, heiße Gase) hervorgerufen werden, übernehmen freie Elektronen einen um so größeren Anteil der Gesamtleitung, je dünner das Gas wird. In Edelgasen (Helium, Argon) ist dies bereits bei normaler Dichte in merkbarem Betrage der Fall, wie Bestimmungen der Teilchenbeweglichkeit gezeigt haben (vgl. den Artikel „Elektrizitätsleitung in Gasen").

In Metallen endlich hat man aller Wahrscheinlichkeit nach reine Elektronenleitung anzunehmen. In jedem Metall sind von einem je nach seiner Natur verschiedenen Bruchteil seiner Atome Elektronen als abgespalten anzunehmen, die sich frei in den Zwischenräumen der festliegenden Atome und der mit der positiven Restladung versehenen Atomkerne bewegen. Die Zusammenstöße, die die Elektronen bei ihrer gerichteten Bewegung mit den Atomen erleiden, bewirken den nach Art einer Reibung wirkenden Leitungswiderstand. Der entstehende Ueberschuß an ungerichteter Bewegung gibt sich als Stromwärme kund. An der regellosen Wärmebewegung beteiligen sich die Atome ebensowohl als die freien Elektronen. Die letzteren allein indessen vermitteln infolge ihrer Bewegung den Wärmetransport durch Wärmeleitung. Deshalb sind Wärme- und Elektrizitätsleitung einander proportional: Gesetz von Wiedemann und Franz. Siehe auch den Artikel „Elektrizitätsleitung".

4e) Abgabe freier Elektrizität bei Erhitzung und Bestrahlung. Durch Erhitzung auf Weißglut, Bestrahlung mit Licht-, Kathoden-, Kanal-, Röntgenstrahlen wird die Materie zur Abgabe negativer Elektrizität durch Aussendung freier Elektronen in Form von mehr oder weniger schnellen Kathodenstrahlen angeregt. Es sind dies die glüh- und lichtelektrischen und damit verwandten Phänomene, die dahin zu deuten sind, daß die Elektronen durch die genannten Agenzien in so lebhafte Bewegung geraten, daß ihr Verband zum Körper hinreichend gelockert wird. Aehnliches geschieht bei dem explosiven Atomzerfall radioaktiver Substanzen (vgl. die Artikel „Lichtelektrische Erscheinungen" und „Glühelektrische Erscheinungen").

4f) Statische Verteilung der Elektrizität. Influenzelektrizität von Leitern und Isolatoren. Wie die hydrostatischen Gesetze nicht dadurch geändert werden, daß man die Flüssigkeiten als aus Atomen und Molekülen aufgebaut ansieht, so ändert auch die elektronentheoretische Anschauung nichts an den aus der Vorstellung eines Fluidums erhaltenen Regeln der Elektrostatik. Die Verteilung eines Ueberschusses oder Mangels von Elektronen muß auf einem Leiter unter dem Einfluß der gegenseitigen Abstoßungen derart sein, daß sich die gesamte überschüssige Elektrizität an der Leiteroberfläche ansammelt. Dies wurde zuerst von Faraday in dem bekannten Käfigversuch experimentell bewiesen.

Wird ein Leiter in ein elektrisches Feld gebracht, so tritt unter dem Einfluß desselben ein Strömen der Elektronen bezw. Ionen im Leiter ein, solange bis das elektrische Feld im Leiter verschwunden ist. Es findet also im Leiter in Richtung des ursprünglichen Feldes eine polare Trennung freier Elektrizität statt, die auch auf das Feld außerhalb des Leiters verzerrend einwirkt. Auch auf Isolatoren, die in ein elektrisches Feld eingeführt werden, wirkt dieses influenzierend ein. Während aber bei Leitern ein wirkliches Strömen der geladenen Teilchen in denselben erfolgt, tritt im Dielektrikum nur eine interatomare Verschiebung des Ions und Elektrons ein. Die hierdurch bewirkte Polarisation der Materie, für welche die durch die Querschnittseinheit verschobene Elektrizitätsmenge ein Maß bildet, ist um so größer, je größer die Dielektrizitätskonstante des Isolators ist. Ein großer Gehalt an geladenen Teilchen und eine kleine rücktreibende Direktionskraft derselben bewirken einen großen Wert dieser Materialkonstante. An den Ein- und Austrittsstellen des elektrischen Feldes trägt der Isolator entgegengesetzte Flächenladungen. Während aber beim Leiter die Trennung von + und — Elektrizität auf beliebig große Strecken stattfindet, erfolgt sie im Isolator nur auf atomare Distanzen. Bei Zerteilen des Leiters und Herausnahme der Stücke aus dem Felde erweisen sich darum die einzelnen Teile je nach ihrer vorherigen Lage + oder — geladen, während im Gegensatz hierzu jedes Stück eines im Felde zerteilten und nachher aus dem Felde entfernten Isolators ungeladen ist (vgl. die Artikel „Elektrisches Feld" und „Elektrische Influenz").

4g) Osmotische Theorie der Ionen und Elektronen. Berührungs-, Reibungs-, Thermo-Elektrizität. Die An-

Digitized by Google

wendung der Vorstellungen der kinetischen Gastheorie auf die Moleküle und Ionen gelöster Stoffe durch van t'Hoff und weiterhin durch Nernst hat ungewöhnliche Erfolge in der Physik und Chemie der Lösungen gezeitigt. Wie die Moleküle eines Gases so üben auch die Moleküle und Ionen eines gelösten Stoffes infolge ihrer ungeordneten Wärmebewegung einen Druck aus, den man den osmotischen Druck nennt. Ebenso üben die kleinsten Teilchen eines festen Stoffes, der mit einem Lösungsmittel in Berührung ist, einen Druck aus, der sie zur Lösung treibt, und den man deshalb als Lösungsdruck oder Lösungstension bezeichnet. Dieses Expansionsbestreben der materiellen Partikel ist es, welches die Lösung von Stoffen und das Streben nach Verdünnung in der sogenannten Diffusion hervorruft, und der Umstand, daß an den hierdurch veranlaßten Bewegungen auch die geladenen kleinsten Bestandteile der Materie, die Ionen, teilnehmen, bringt die eigentümliche Elektrizitätserregung hervor, die stets dann auftritt, wenn Lösungen verschiedener Konzentration oder Lösungen mit festen Körpern in Berührung sind.

Die Erweiterung dieser Anschauungen auf die freien Elektronen in metallischen Leitern, d. h. die Annahme, daß auch den Elektronen ein osmotischer Druck zuzuschreiben ist, hat auch bereits auf dem Gebiete der elektrischen Erscheinungen in Metallen bemerkenswerte Ergebnisse zu verzeichnen. Indessen gibt es hier zurzeit noch eine ganze Reihe von Dingen, die der Aufklärung große Schwierigkeiten in den Weg stellen. Hier mag nur kurz erwähnt werden, daß die Elektrizitätserregung, welche bei der Berührung zweier Metalle eintritt, nach der genannten Vorstellung durch den erstrebten Ausgleich der in verschiedenen Metallen verschieden großen Elektronendrucke hervorgerufen wird. Der erstrebte Druckausgleich kann hierbei nur zu einem ganz kleinen Bruchteil erfolgen, weil durch das Uebertreten der Elektronen aus dem einen Metall in das andere sogleich ein elektrisches Gegenfeld entsteht, welches einen weiteren Ausgleich verhindert. Die Größe der sich so erklärenden kontaktelektromotorischen Kraft zwischen zwei Metallen ist noch nicht direkt experimentell ermittelt worden. Eine auf den Oberflächen sich stets bildende dünne Wasserhaut setzt der Messung große Schwierigkeiten entgegen, weil die Lösungstension der Metalle gegen die Wasserschicht elektromotorische Kräfte von höherer Größenordnung (ca. 1 Volt gegen einige Hundertstel, die nach dem Elektroneneffekt zu erwarten sind) erzeugt. Die bisher gewöhnlich als Berührungsspannung oder Voltaeffekt angegebenen Zahlen entsprechen der Wassererregung. Es ist aber bereits festgestellt worden, daß diese Spannung sehr viel geringer wird, wenn die Metalloberflächen intensiv getrocknet werden. Indirekt ist die wahre Berührungsspannung der Messung zugänglich durch die Arbeit, welche ein durch die Berührungsstelle in der Richtung des Potentialgefälles hindurchgesandter elektrischer Strom leistet, und welche sich in der sogenannten Peltierwärme kundgibt. Der Abhängigkeit des Elektronendrucks von der Temperatur sind die thermoelektrischen Erscheinungen zuzuschreiben (vgl. den Artikel „Thermoelektrizität"). Die Berührungsspannung zwischen zwei Metallen steigt mit der Temperatur, und auch zwischen verschieden temperierten Stellen eines und desselben Metalls besteht eine mit der Größe des Temperaturgefälles wachsende Spannungsdifferenz. Auch diese hat, wie Lord Kelvin zuerst gezeigt hat, bei Fließen eines Stromes längs eines Temperaturgefälles je nach der Stromrichtung eine Produktion oder Absorption von Wärme zur Folge, welche als der dem Peltierschen analoge Thomsoneffekt bekannt ist.

Die Entstehung der Reibungselektrizität ist jedenfalls auf die Berührungselektrizität, sei es mit oder ohne Beteiligung der Wasserhaut, zurückzuführen. Die hohen, bis zur Funkenbildung führenden Spannungen, welche bei der Reibung zweier Isolatoren, etwa Glas und Seide, erreicht werden, erklären sich durch das Auseinanderreißen der äußerst dünnen elektrischen Doppelschicht, die an der Berührungsfläche sich bildet. Wie bei dem Auseinanderziehen der Platten eines geladenen Kondensators steigt die Spannungsdifferenz, und zwar hier so außerordentlich stark, weil die Belegungen der Doppelschicht zuerst molekularen Abstand haben. Die mannigfachen Einflüsse, die ein Magnetfeld auf die Strom- und Wärmeleitung in Metallen ausübt, bilden ein wichtiges Material zur Prüfung elektronentheoretischer Anschauungen, zeigen aber durch ihre vielfache Kompliziertheit an, daß die einfachen Vorstellungen von der Rolle, welche die Elektrizität in der Materie spielt, nicht überall ausreichen, sondern in vielen Fällen noch besonderer Modifikationen bedürfen. Dasselbe beweisen auch die oft komplizierteren Formen der optischen Erscheinungen in der Materie, wie z. B. des Zeemaneffekts, welche durch eine Annahme spezieller Koppelungen der kleinsten Teilchen ihre Erklärung zu finden scheinen.

Literatur. *G. Mie, Lehrbuch der Elektrizität und des Magnetismus. Stuttgart 1910. — H. Starke, Experimentelle Elektrizitätslehre. 2. Aufl. Leipzig 1910.*

H. Starke.

Digitized by Google

Elektrische Arbeit.

1. Definition der elektrischen Arbeit. 2. Einheit der elektrischen Arbeit. 3. Meßmethoden für die elektrische Arbeit. Allgemeines. 4. Elektrolytische Zähler. 5. Pendelzähler. 6. Kollektormotorzähler. 7. Quecksilbermotorzähler. 8. Oszillierende Zähler. 9. Induktionszähler. 10. Strom- und Spannungswandler.

1. Definition der elektrischen Arbeit. Unter elektrischer Arbeit hat man diejenige Größe zu verstehen, durch welche man den Energieinhalt irgendeines räumlich begrenzten Systems auf elektrischem Wege vergrößern oder verringern kann. Während sich also eine Energieangabe auf einen vorhandenen Zustand bezieht, wird durch eine Arbeitsangabe eine Zustandsänderung charakterisiert.

Es erfolge die Zuführung der elektrischen Arbeit durch zwei Leitungen, in denen ein beliebiger elektrischer Strom fließt, während zwischen den Leitungen eine konstante Spannung E besteht; dann ist die in einem Zeitintervall zugeführte elektrische Arbeit definiert durch das Produkt aus der Spannung E und der gesamten in diesem Zeitintervall zugeführten Elektrizitätsmenge Q. Ist auch die Stromstärke konstant, so ist die in der Zeit t zugeführte Arbeit proportional EIt. Sind dagegen Spannung und Strom mit der Zeit veränderlich, so wird in dem kleinen Zeitintervall dt die Arbeit eidt zugeführt und im Intervall von t_0 bis t_1 die Arbeit $\int_{t_0}^{t_1} e\,i\,dt$. Darin ist e der Augenblickswert der Spannung, i derjenige des Stromes (vgl. den Artikel „Elektrische Leistung").

2. Einheit der elektrischen Arbeit. Die Einheit der elektrischen Arbeit wird dadurch festgelegt, daß man die Proportionalitätskonstante gleich 1 setzt, und die Leistung EI im elektromagnetischen Maßsystem mißt.

Fließt ein Strom von 1 A bei 1 V Spannungsabfall 1 Sek. lang, so ist die zugeführte Arbeit 1 Wattsekunde.

In den meisten Fällen ist diese Einheit zu klein; man benutzt daher häufiger 1 Wattstunde = 60^2 Wattsekunden, 1 Kilowattstunde = 1000 Wattstunden, 1 Megawattstunde = 1 Million Wattstunden.

3. Meßmethoden für die elektrische Arbeit. Zur Messung der elektrischen Arbeit bei Gleichstrom, ein- oder mehrphasigem Wechselstrom werden genau dieselben Schaltungen angewandt, wie bei der Leistungsmessung (vgl. den Artikel „Elektrische Leistung"). Bleibt in einem Zeitintervall $(t_1 - t_0)$ die zugeführte Leistung L unverändert, so erhält man die Arbeit, indem man die gemessene Leistung mit dem Zeitintervall multipliziert

$$A = L(t_1 - t_0)$$

Schwankt der Wert der Leistung, so kann man z. B. durch ein Registrierinstrument den Verlauf der Leistungskurve aufzeichnen. Die von t_0 bis t_1 zugeführte Arbeit ist dann gleich dem Flächeninhalt, den die Leistungskurve ACB (Fig. 1), die Zeitachse

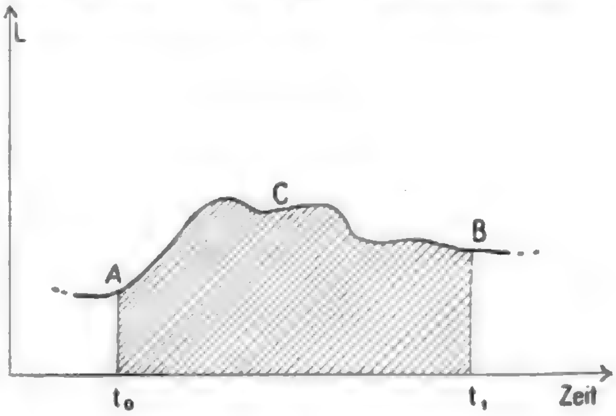


Fig. 1.

und die begrenzenden Ordinaten in t_0 und t_1 umschließen.

Der Begriff der elektrischen Arbeit ist für die Praxis deshalb von besonderer Wichtigkeit, weil nach diesen Einheiten die Abrechnung der elektrischen Zentralen mit ihren Abnehmern erfolgt. Natürlich kann in diesen Fällen die Messung nicht durch die Auswertung von Leistungsdiagrammen erfolgen, vielmehr ist dafür eine besondere Klasse von Apparaten entstanden, die Elektrizitätszähler genannt werden.

Die allgemeinen Anforderungen, die an diese Apparate gestellt werden, weichen wesentlich von denjenigen ab, die man sonst an physikalische Apparate zu stellen pflegt. Dies hat im großen und ganzen seinen Grund darin, daß die Zähler oft einer rauhen Behandlung ausgesetzt sind. Möglichste Unabhängigkeit von starken Schwankungen der Temperatur und der Feuchtigkeit, Unempfindlichkeit gegen Kurzschlüsse, gegen Staub, Stöße und Erschütterungen sind derartige Forderungen, die gestellt werden müssen. Weiter ist gute Transportfähigkeit, Verschließbarkeit und Plombierbarkeit zu verlangen.

Schließlich ist eine der wichtigsten Forderungen, daß die beweglichen Teile des Zählers einer möglichst geringen Abnutzung ausgesetzt sind, so daß auch nach jahrelangem Gebrauch die Angaben des Apparates keine zu große Aenderung erfahren.

Die Formel für die elektrische Arbeit enthält ebenso wie die für die elektrische Leistung das Produkt aus Strom und Spannung. Die „Wattstundenzähler" enthalten daher, ebenso wie die Leistungszeiger zwei Stromkreise, von denen der eine —

Digitized by Google

wie ein Spannungsmesser geschaltet und Spannungskreis genannt — von der Betriebsspannung beeinflußt wird, der andere — wie ein Strommesser geschaltet und Hauptstromkreis genannt — vom Arbeitsstrom durchflossen wird.

Die Schaltung erfolgt in der Regel in der durch Figur 2 dargestellten Weise.

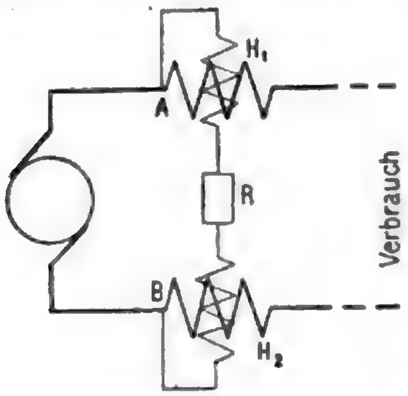


Fig. 2.

Zwischen A und B ist der Spannungskreis geschaltet; er besteht aus den Spannungsspulen und einem größeren Zusatzwiderstand R. Die vom Arbeitsstrom durchflossenen Hauptstromspulen H_1 und H_2, meist zwei an Zahl sind so angeordnet, daß sie, von den Abzweigpunkten A und B aus gesehen, auf der Seite des Verbrauchers liegen. Der Zähler mißt in dieser Lage die Arbeit im Verbrauchskreise zwischen den Punkten A und B; d. h. es wird die in den Hauptstromspulen verbrauchte Arbeit mit gemessen, dagegen diejenige im Spannungskreise nicht. Letztere wird also kostenlos von der Zentrale getragen; da der Spannungskreis dauernd angeschlossen ist, gleichgültig, ob der Verbraucher elektrische Arbeit entnimmt oder nicht, so kann diese Arbeitsabgabe, namentlich wenn es sich um geringe Energieabgabe in dem Verbrauchsstromkreis handelt, für die Zentrale einen merklichen Verlust bedeuten.

Deswegen werden häufiger Zähler angewandt, die keinen Spannungskreis enthalten; bei diesen ist vorausgesetzt, daß die Spannung konstant ist, was ja auch bei modernen Zentralen im Mittel mit genügender Genauigkeit zutrifft. Zähler ohne Spannungskreis messen also nur $\int Idt$ und werden daher Amperestundenzähler genannt. Unter Annahme einer konstanten Spannung, die auf dem Apparat angegeben sein muß, kann natürlich das Zählwerk so eingerichtet werden, daß es wiederum Wattstunden angibt. Diese Angaben gelten aber nur dann, wenn die Spannung E dauernd und unverändert den Wert hat, für welchen das Zählwerk eingerichtet ist. Arbeitet man mit einer davon abweichenden Spannung E_1, so muß man die Zählerangaben mit $E_1 : E$ multiplizieren, um den wahren Verbrauch zu erhalten.

Kann man nicht nur die Spannung, sondern auch den Arbeitsstrom als konstant voraussetzen, d. h. ist die elektrische Leistung L dauernd konstant, so genügt es, die Zeit t zu messen, während welcher die Leistung abgegeben wird; die Arbeit ist dann

$$Lt.$$

Dementsprechend hat man sogenannte Zeitzähler konstruiert, die da angewandt werden, wo durch einen Schalter stets dieselbe Belastung, z. B. eine ganz bestimmte Zahl von Lampen eingeschaltet wird. Die Zeitzähler sind im wesentlichen gewöhnliche Unruheuhren, die durch Betätigung des Schalters angestoßen oder angehalten werden. Natürlich kann auch hier unter Annahme einer ganz bestimmten Leistung, die durch den Schalter im Zähler eingeschaltet wird, das Zifferblatt statt in Stunden und Minuten in Kilowattstunden geteilt sein.

Die Prinzipien, die bei der Konstruktion von Zählern angewandt worden sind, sind recht mannigfaltig; im folgenden sollen nur diejenigen besprochen werden, die sich in praktisch ausgeführten Konstruktionen als lebensfähig erwiesen haben. Von den mannigfachen, verschiedenartigen Ausführungsformen, die diese Prinzipien bei den einzelnen Firmen erfahren haben, kann hier natürlich immer nur eine einzelne beschrieben werden.

4. Elektrolytische Zähler. Der elektrolytische Zähler ist vom rein physikalischen Standpunkt aus der geborene Amperestundenzähler für Gleichstrom. Nach dem Faradayschen Gesetz wird von einem Strom, der durch einen Elektrolyten fließt, an der Kathode Wasserstoff oder Metall ausgeschieden in einer Menge, die der durchgeflossenen Elektrizitätsmenge proportional ist. Der praktischen Ausführung eines auf diesem Gesetz beruhenden Zählers haben sich aber außerordentliche Schwierigkeiten entgegengestellt, und von den zahlreichen Konstruktionen, die versucht sind, hat sich bis jetzt nur eine als lebensfähig erwiesen: die Stia-Zähler der Firma Schott & Gen. in Jena.

In diesem Zähler wird als Elektrolyt eine Lösung von Jodquecksilber und Jodkalium in Wasser benutzt; diese Lösung hat die wichtige Eigenschaft, daß ihre chemische Zusammensetzung auch in langen Zeiten keine Veränderung erfährt.

Der Elektrolyt ist in einem allseitig zugeschmolzenen Glasrohr G eingeschlossen (Fig. 3); oben besitzt das Glasrohr eine ringförmige Erweiterung A, die mit dem als Anode dienenden Quecksilber angefüllt ist. Etwas unterhalb dieses Ringes ist die Kathode K

Digitized by Google

angeordnet, die aus einem schwach konisch geformten dünnen Iridiumblech besteht. Bei Stromdurchgang wird an der Kathode Quecksilber ausgeschieden, das abtropft und in ein zylindrisches Rohr G fällt. Das Rohr ist mit einer Teilung H versehen, an welcher Amperestunden (oder unter Voraussetzung konstanter Betriebsspannung Wattstunden) abgelesen werden. Das Anion vereinigt sich mit dem in der ringförmigen Rinne befindlichen Quecksilber und regeneriert den Elektrolyten. Zur Verringerung des Widerstandes sind Anode und Kathode dicht aneinander gerückt; ihre ringförmige Form gewährleistet eine gleichmäßige Stromverteilung. Die Kathode liegt etwas tiefer als die Anode, damit die bei der Elektrolyse auftretenden Konzentrationsänderungen des Elektrolyten sich durch Strömung möglichst rasch ausgleichen. Ein kleiner Zaun B aus vertikalen Glasstäben verhindert, daß das Quecksilber durch Erschütterungen in das Fallrohr geschleudert wird. Um das Niveau des Anodenquecksilbers, das bei der Elektrolyse aufgezehrt wird, in gleicher Höhe zu halten, ist ein Reservoir C angeschlossen, ähnlich den Reservoiren an alten Oellampen.

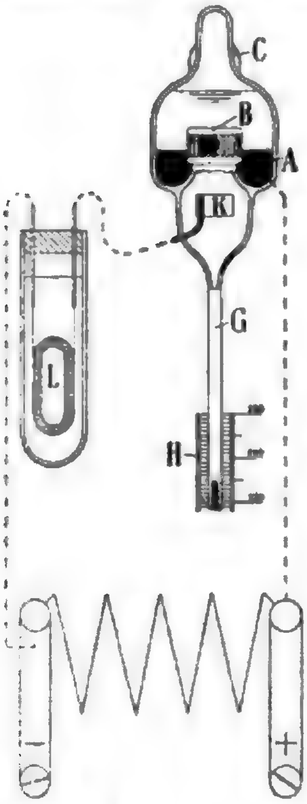


Fig. 3.

Nach einer gewissen Zeit ist auch das Quecksilber des Reservoirs C verbraucht; alles Quecksilber befindet sich in dem geteilten Fallrohr, und muß durch einen Revisionsbeamten durch Kippen um eine horizontale Achse, die am oberen Ende des Zählergestelles angebracht ist, in das Reservoir zurückgebracht werden.

Durch den Elektrolyten kann man naturgemäß nur einen verhältnismäßig kleinen Strom schicken (einige Zehntel Ampere). Für stärkere Ströme muß zur Zelle ein Nebenschlußwiderstand gelegt werden. Dabei ist zu berücksichtigen, daß der Widerstand des Elektrolyten stark mit der Temperatur abnimmt; um diese Eigenschaft zu kompensieren, wird ihm ein Nickelwiderstand L vorgeschaltet, der seinen Widerstand bei steigender Temperatur in entgegengesetztem Sinne ändert.

Bei den für die Praxis bestimmten Zählern wird der Nebenschlußwiderstand so groß gewählt, daß das Fallrohr verhältnismäßig langsam volläuft, damit das Kippen im Jahre nur wenigemal erforderlich wird. Demgegenüber ist von der Firma Schott ein Zähler in den Handel gebracht, der vornehmlich für Laboratorien bestimmt ist: in demselben sind mehrere Elektroden parallel geschaltet, so daß einige Ampère direkt durch die Zersetzungszelle fließen können und das Fallrohr verhältnismäßig rasch volläuft, und auf diese Weise in kurzer Zeit eine genaue Messung ermöglicht wird.

Der Hauptvorzug der Stiazähler besteht darin, daß bewegliche Teile, die der Abnutzung unterworfen sind, fehlen, und daß daher bei sachgemäßer Anwendung die Eichung keiner Aenderung mit der Zeit unterliegt. Die erste Eichung ist etwas mühsam und zeitraubend; zur Kontrolle der Richtigkeit wird es im allgemeinen genügen, sich davon zu überzeugen, daß die Widerstände unverändert geblieben sind. Gefährlich werden starke Ueberlastung und heftige Kurzschlüsse durch den Zähler.

Zwischen dem Widerstand S des Nebenschlusses, dem Widerstand r des die Zersetzungszelle enthaltenden abgezweigten Kreises und dem in Gramm ausgedrückten Quecksilberinhalt G des bis zum obersten Skalenteilstriche gefüllten Meßrohres besteht die Beziehung

$$G = \frac{1000}{E} \cdot 3{,}726 \, \frac{A}{1 + \frac{r}{S}} \text{ für kWstzähler}$$

und

$$G = 3{,}726 \, \frac{a}{1 + \frac{r}{S}} \text{ für Astzähler.}$$

Darin bedeutet

A die Zahl der Kilowattstunden.

a die Zahl der Amperestunden, welche der oberste Skalenstrich angibt.

E die Betriebsspannung, die bei kWstzählern auf dem Apparat vermerkt ist.

5. Pendelzähler. Die Pendelzähler gehören zu den ältesten Zählern, die konstruiert und in den Handel gebracht sind; sie sind von der Firma H. Aron in Charlottenburg zuerst in einer für die Praxis brauchbaren Form konstruiert und stetig vervollkommnet worden.

Der Zähler in seiner einfachsten Form ist ein Amperestundenzähler für Gleichstrom; er besteht aus einer guten Pendeluhr (Regulator), an deren Pendel ein Dauermagnet mit vertikaler Achslage befestigt ist. Unterhalb des Magneten befindet sich eine Spule, durch welche der Arbeitsstrom fließt. Dadurch erfährt die Schwingungsdauer des Pendels je nach Lage der Stromrichtung

Digitized by Google

der Spule eine Beschleunigung oder Verzögerung; die Uhr wird um einen gewissen Betrag vor- oder nachgehen, aus dem auf die Zahl der Amperestunden geschlossen werden kann. Bei genauen Messungen ist es vorteilhafter, das Pendel zu beschleunigen als zu verzögern. Zur Eichung bestimmt man nach den üblichen Methoden die Schwingungsdauer des Pendels in Abhängigkeit von der Stromstärke, was mit großer Genauigkeit ausgeführt werden kann. Die Zunahme der Zahl der Pendelschwingungen pro Minute δn ist nicht genau proportional der Stromstärke in der Spule; sie gehorcht vielmehr dem Gesetz

$$\delta n = aJ - bJ^2$$

Es müssen daher die Messungen für mehrere Stromstärken gemacht werden, um die Konstanten a und b berechnen zu können.

Diese ursprüngliche Ausführungsform der Aronzähler ist für die Anforderungen, die heutzutage im praktischen Betriebe gestellt werden, gänzlich unzulänglich, kann aber im Laboratorium unter Umständen bessere Dienste leisten, als die modernen für den Verkehr bestimmten Formen.

Ersetzt man den Dauermagneten am Pendel durch eine Spule mit vertikaler Achse, die unter Vorschaltung eines geeigneten Widerstandes an die Betriebsspannung angeschlossen wird, so bildet diese Spule in Verbindung mit der, parallel dazu, darunter liegenden Hauptstromspule ein Dynamometer und die Gangänderung der Uhr gibt nicht mehr Amperestunden, sondern Wattstunden an. Aron führt einen derartigen Zähler aus, der als Kontroll- oder Eichapparat vielfach Verwendung findet. In diesem Apparate (Fig. 4) sind zwei derartig ausgerüstete, einander gleiche Uhren nebeneinander aufgehängt. Die Spannungsspulen der beiden Uhren sind hintereinander geschaltet, ebenso die beiden Hauptstromspulen. Während aber die Spannungsspulen die gleiche Windungsrichtung haben, sind die Windungsrichtungen der Hauptstromspulen einander entgegengerichtet. Setzt man konstante Spannung E voraus, so geht die eine Uhr vor um einen Betrag, der proportional

$$aJ - bJ^2$$

ist, die andere nach um einen Betrag, den man erhält, wenn man in der letzten Formel J durch —J ersetzt, d. h.

$$-aJ - bJ^2.$$

Die beiden Uhren zeigen danach eine Gangdifferenz gleich der Differenz dieser beiden Ausdrücke, d. i.

$$2aJ$$

oder die Gangdifferenz der Uhren wird proportional der Stromstärke, das quadratische Glied ist verschwunden. Aendert sich auch die Spannung, so wird die Gangdifferenz, wie leicht ersichtlich, proportional EJt; der Zähler ist ein Wattstundenzähler, dessen Konstante experimentell ermittelt

Fig. 4.

werden muß. Sie gibt an, wieviel Wattstunden 1 Minute Gangdifferenz entsprechen. Voraussetzung ist dabei, daß die stromlosen Zähler genau gleichen Gang haben. Dies muß an Ort und Stelle stets erst sorgfältig geprüft werden, zumal die langen Pendel während des Transportes ausgehängt werden müssen.

Da der Zähler auf dem dynamometrischen Prinzip beruht, ist er auch geeignet, die elektrische Arbeit eines Wechselstromes zu messen. Natürlich müssen die bei Wechselstrommessungen mit Dynamometern auftretenden Fehlerquellen vermieden werden (s. den Artikel „Elektrische Leistung“).

Es seien nun kurz diejenigen Abänderungen des Apparates besprochen, die getroffen worden sind, um ihn für die heutige Praxis brauchbar zu machen.

a) Es werden die beiden Zifferblätter

Digitized by Google

der Uhren weggelassen. Statt dessen läßt man das letzte Rad A_1 der einen Uhr und das entsprechende A_2 der anderen Uhr auf ein senkrecht dazu gestelltes Rad B arbeiten, das als Planetenrad (Fig. 5) bezeichnet wird. Drehen sich A_1 und A_2 mit gleicher Geschwindigkeit in entgegengesetzter Richtung, so rollt B gleichmäßig auf beiden Rädern ab und die Achse des Rades verändert nicht ihre Lage. Wird jetzt aber A_1 beschleunigt, A_2 verzögert, so fängt sich die Achse von B an zu drehen mit einer Geschwindigkeit, die der Differenz der Geschwindigkeiten von A_1 und B_1 proportional ist. Da nun für den Zähler nur die Differenz der Zeigerstellung der beiden Uhrwerke in Frage kommt, so genügt es, die Achse von B auf ein Zählwerk arbeiten zu lassen; das Zählwerk zeigt dann bei geeigneter Wahl der Raddurchmesser und Zahnzahlen, und geeigneter Teilung des Zifferblattes direkt Wattstunden oder Kilowattstunden an.

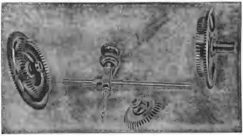


Fig. 5.

β) Die Uhren werden nicht mehr von Hand, sondern automatisch durch die zur Verfügung stehende Energiequelle aufgezogen. Da letztere dauernd angeschlossen ist, so können die Uhrwerke mit ganz kurzen Federn ausgerüstet werden. Der Aufzug erfolgt in der Minute etwa 4 mal.

γ) Die Langpendeluhren müssen mit der Hand angestoßen werden. Bleibt nun ein Pendel aus irgendeinem Grunde (z. B. infolge von einem Kurzschluß) stehen, so macht der Zähler ganz falsche Angaben. Deswegen sind die neuen Zähler mit kurzen Pendeln ausgerüstet, die auch während des Transportes nicht ausgehängt zu werden brauchen. Das Echappement der Uhren ist derart ausgebildet, daß die Pendel von selbst in Schwingungen geraten, sobald die Aufzugsfedern gespannt werden.

δ) Die Uhren müssen bei unbelastetem Zähler auf genau gleichen Gang reguliert sein; dies ist bei den kurzen Pendeln auf die Dauer noch viel weniger zu erreichen als bei den langen. Es ist deshalb eine Kompensationsvorrichtung vorgesehen, deren Wirksamkeit sich kurz folgendermaßen charakterisieren läßt: in Abständen von je 10 Min. wird die Drehrichtung des Zählwerkes auf rein mechanischem Wege umgesteuert, so daß dadurch ein etwaiger Leerlauf rückgängig gemacht wird. Damit nun nicht auch bei belastetem Zähler der Zeiger des Zählwerks nur vor- und rückwärts geht, wird gleichzeitig die Stromrichtung in beiden Spannungsspulen umgedreht, so daß nunmehr das beschleunigte Pendel verzögert, das verzögerte beschleunigt wird. Dadurch wird die Drehrichtung des Planetenrades, und damit des Zählwerks nochmals umgedreht, so daß die durch die elektrodynamischen Kräfte hervorgerufenen Bewegungen des Zählwerks dauernd in derselben Richtung erfolgen; aber der auf rein mechanischen Ursachen beruhende Leerlauf des Zählers ist beseitigt. Fig. 6 zeigt die Gesamtansicht eines Kurzpendelzählers, von dem die Schutzkappe abgenommen ist.

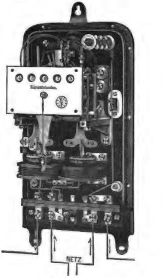


Fig. 6.

Digitized by Google

Der Aronzähler ist, wie schon erwähnt, sowohl für Gleichstrom als auch für Wechselstrom brauchbar. Da aber die Bedingungen, die an ein einwandfreies Dynamometer für Wechselstrom zu stellen sind (s. elektrische Leistung), hier schwer zu erfüllen sind, so sollte es Regel sein, daß die für Wechselstrom bestimmten Zähler auch mit Wechselstrom geprüft werden müssen. Die häufig ausgesprochene Annahme, daß ein mit Gleichstrom geeichter Aronzähler auch bei Verwendung mit Wechselstrom unbedingt richtig zeigen müsse, ist irrig.

Der Aronzähler ist vortrefflich geeignet, um auch die elektrische Arbeit in Dreileiternetzen oder Drehstromsystemen zu messen. Gemäß den für diese Stromsysteme geltenden Formeln für die Leistungsmessung genügt es, je eine der Hauptstromspulen in die Außenleiter und die Spannungsspulen zwischen je einen Außenleiter und den Mittelleiter zu legen.

6. Kollektormotorzähler. 6a. Wattstundenzähler. Diese Zähler beruhen auf dem dynamometrischen Prinzip und sind für Gleichstrom bestimmt. Sie können zwar auch mit Wechselstrom benutzt werden; tatsächlich kommt aber diese Verwendung heutzutage nicht mehr in Frage, weil man für Wechselstrom in den Induktionszählern (s. Abschnitt 9) zuverlässigere Apparate besitzt.

Die Kollektorwattstundenzähler bestehen aus einem eisenlosen gebremsten Gleichstrommotor (Fig. 7). Die feststehenden

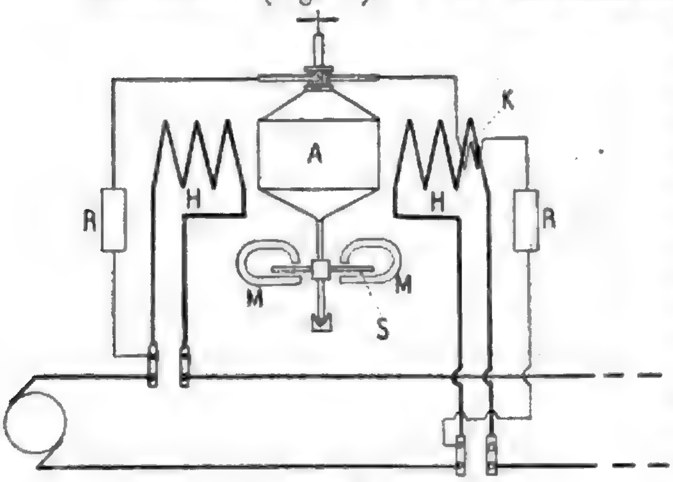


Fig. 7.

Feldwickelungen des Motors werden durch zwei Hauptspulen HH gebildet. Diese erzeugen ein dem Hauptstrom proportionales magnetisches Feld. In dem Felde dreht sich ein eisenloser Anker A, der zusammen mit einem Vorschaltwiderstand RR den Spannungskreis des Zählers bildet. Anker und Hauptstromspulen bilden also ein Dynamometer; die Tourenzahl des Ankers ist infolge von dem vorgeschalteten Widerstand so gering, daß die elektromotorische Gegenkraft, welche im Anker durch seine Drehung im magnetischen Felde der Hauptstromspulen auftreten muß, gegen die Betriebsspannung E verschwindend klein ist. Daher ist der Spannungsstrom unabhängig von der Ankergeschwindigkeit proportional der Spannung E und das den Anker antreibende Drehmoment proportional der Leistung EI.

An der Ankerachse ist eine kreisrunde Kupfer- oder Aluminiumscheibe S befestigt, die sich zwischen den Polen eines feststehenden Dauermagneten M dreht. Dadurch werden in der Scheibe Ströme induziert, die bremsend wirken; das Drehmoment der bremsenden Kräfte ist proportional der Geschwindigkeit der Scheibe.

Die Bewegung des Ankers erfolgt mit einer konstanten Geschwindigkeit, wenn das bremsende Drehmoment gleich dem antreibenden ist, d. h. wenn die Drehgeschwindigkeit proportional der Leistung EI ist, oder die Zahl der Umdrehungen proportional der elektrischen Arbeit EIt. Man hat also noch an der Achse einen Tourenzähler anzubringen, der bei geeigneter Uebersetzung der Räder an einem Zifferblatt die Arbeit in Wst oder kWst anzeigt.

Die in der Bremsscheibe bei Lauf des Ankers erzeugten Ströme sind von der Temperatur abhängig; denn nur die in der Scheibe erzeugte elektromotorische Kraft ist proportional der Geschwindigkeit; da aber der Widerstand reiner Metalle mit steigender Temperatur um 0,4 % pro Grad wächst, so nehmen die durch Induktion erzeugten Ströme um denselben Betrag pro Grad Temperaturdifferenz ab und entsprechend der daraus sich ergebenden Abnahme des Bremsmomentes, würde die Geschwindigkeit um etwa 0,4 % pro Grad wachsen. Um diesen Fehler zu kompensieren, wird der Vorschaltwiderstand RR nicht wie bei Spannungsmessern aus Manganin, sondern aus Reinnickeldraht hergestellt, der ebenfalls einen großen Temperaturkoeffizienten des Widerstandes besitzt. Das hat zur Folge, daß bei konstanter Leistung der äußeren Belastung und steigender Temperatur der Spannungsstrom abnimmt und damit auch das antreibende Drehmoment, ebenso wie vorher das bremsende. Es kann also auf diese Weise der Einfluß der Temperatur genügend kompensiert werden.

In den bisherigen Betrachtungen ist auf einen wichtigen Faktor keine Rücksicht genommen, das ist die Reibung. Sie tritt auf als Luft- und Lagerreibung, ferner als Reibung der Bürsten am Kollektor und als Zählwerksreibung und fügt ein nicht zu vernachlässigendes bremsendes Drehmoment hinzu, welches die Proportionalität der Geschwindigkeit mit der Leistung stört.

Digitized by Google

Man kompensiert die Reibung, indem man in den Spannungskreis eine feststehende Spule K (Fig. 7) einschaltet, welche die magnetische Wirkung der Hauptstromspule verstärkt. Durch Nähern oder Entfernen dieser sogenannten Kompensationsspule kann die Größe des zusätzlichen Drehmomentes auf den gewünschten Betrag gebracht werden. Ist die Betriebsspannung konstant, so ist auch das zusätzliche Drehmoment unveränderlich, während das Drehmoment der Reibung mit der Geschwindigkeit veränderlich ist. Die Reibungskompensation ist daher nicht vollkommen und die Folge davon ist daß die Abweichungen des Zählers von der Richtigkeit sich etwas mit wachsender Hauptstromstärke ändern.

Natürlich muß man darauf bedacht sein, schon durch die Konstruktion die Reibung möglichst gering zu machen; deshalb läßt man die Drehachse auf Steinen (Saphir) laufen oder legt zwischen Drehachse und Stein eine kleine Stahlkugel. Die Stahlspitze der Achse ist meist von einer kleinen Oelkammer umgeben. Es kommt sehr auf gute Beschaffenheit des Steines an; um ihn und die Stahlspitze zu schonen, muß der Anker während des Transportes von dem Stein abgehoben werden. Hierfür ist eine besondere Arretiervorrichtung vorgesehen.

Die Bürstenreibung wird dadurch verkleinert, daß man dem Kollektor einen kleinen Durchmesser gibt, bei modernen Konstruktionen 2 bis 3 mm. Das hat zur Folge, daß der Kollektor nur verhältnismäßig wenig Lamellen haben kann; dementsprechend muß die Wicklung des Ankers gewählt werden. Die Bürsten liegen leicht federnd an; zuweilen bestehen sie aus leichten federnden Metallstreifen, zuweilen wird eine leichte Spiralfeder aus Stahl hinzugefügt. Um dauernd einen zuverlässigen Kontakt an den Bürsten zu erzielen, werden in der Regel Lamellen und Bürsten aus Silber oder Gold hergestellt. Der Kollektor ist der empfindlichste Teil des Zählers, dessen Zustand am ehesten zu Störungen Veranlassung gibt; am gefährlichsten ist ein Einfressen der Bürsten in die Lamellen und die Bildung wenn auch winziger Fünkchen am Kollektor. Manche Firmen versehen das Zählergehäuse mit einer kleinen Haube, die besonders abgenommen werden kann, und durch welche der Kollektor zugänglich wird. Durch vorsichtiges Putzen mit Pariser Rot kann ein angegriffener Kollektor meist wieder in einen tadelfreien Zustand gebracht werden.

Auf sorgfältige Konstruktion des Zählwerks ist sehr großer Wert zu legen. Klemmungen müssen ausgeschlossen sein, weil sonst der Zähler dadurch bis zum Stillstand gebremst werden kann.

Tritt eine Spannungssteigerung ein oder hängt der Apparat an einer Wand, die Erschütterungen ausgesetzt ist, so kann es vorkommen, daß die Kompensationsspule den Anker, auch wenn die Hauptstromspule stromlos ist, in Bewegung setzt, oder, wie man sagt, der Leerlauf eintritt. Um dies zu vermeiden, ist auf der Bremsscheibe ein aus Draht gebogenes eisernes Häkchen befestigt, das von dem Dauermagneten angezogen wird und imstande ist, den Anker bei sehr langsamer Drehung in einer Lage festzuhalten. Kompensationsvorrichtung und Leerlaufhemmung pflegen so eingestellt zu werden, daß der Zähler bei mindestens 1 % der Vollbelastung sicher anläuft, daß aber bei mäßigen Erschütterungen ein Leerlauf ausgeschlossen ist.

Das Drehmoment der Reibung ist eine im Laufe der Zeit in der Regel allmählich zunehmende Größe; es muß daher klein sein gegenüber dem antreibenden Drehmoment, damit der Lauf des Zählers durch die wachsende Reibung nicht zu stark verändert wird. Man kann im großen und ganzen sagen, daß das antreibende Drehmoment bei Vollbelastung nicht unter 6 g cm sinken sollte.

Von den Fehlerquellen, denen Dynamometer ausgesetzt zu sein pflegen, kommt, da es sich um Gleichstrommessungen handelt, nur die Wirkung fremder magnetischer Felder in Betracht. Es gibt Typen, bei denen, namentlich wenn es sich um Apparate für kleine Stromstärken handelt, schon das Erdfeld genügt, um je nach der Richtung, in welcher es wirkt, die Zählerangabe bei halber Last etwa um 1 % zu ändern. Man muß daher bei der Montage der Zähler sorgfältig auf die Umgebung achten. Fremde Starkstromleitungen, auch in der Nähe des Apparates befindliche eiserne Träger können die Angaben des Apparates erheblich beeinflussen. Bei Zählern für große Stromstärken muß die Lage der Hauptstromzuleitungen für die Eichung genau vorgeschrieben sein.

Von der Einstellung der Kompensationsspule und Leerlaufshemmung ist schon die Rede gewesen. Die Geschwindigkeit des Zählerankers bei Vollast wird dadurch auf den vorgeschrieben Wert gebracht, daß man die Pole des Dauermagneten der Ankerachse nähert oder von ihr entfernt. Das Nähern hat einen schnelleren Gang, das Entfernen eine Verlangsamung der Ankergeschwindigkeit zur Folge.

6b. Magnetmotorzähler. Magnetmotorzähler sind Amperestundenzähler für Gleichstrom. Der Anker des Motors dreht sich zwischen den Polen eines Dauermagneten. Seine Bürsten sind mit den Potentialklemmen eines Widerstandes verbun-

Digitized by Google

den, der in den Arbeitsstromkreis eingeschaltet ist. Der Anker ist in der ursprünglichen Form des Zählers nicht gebremst; sieht man zunächst auch von der Reibung ab, so wird seine Geschwindigkeit so lange gesteigert, bis die in ihm durch Induktion erzeugte gegenelektromotorische Kraft dem Potentialabfall am Widerstande gleich ist. Der Anker leistet dann keine Arbeit und läuft stromlos; seine Geschwindigkeit ist proportional dem Arbeitsstrom, seine Drehzahl proportional den verbrauchten Amperestunden. Diese Arbeitsweise erfährt eine Modifikation durch die nicht zu vernachlässigende Reibung (Luft, Lager, Bürsten, Zählwerk). Durch die Reibung wird die Geschwindigkeit verringert, und zwar ist, da sie auf die Dauer nicht konstant erhalten werden kann, der Geschwindigkeitsnachlaß mit der Zeit veränderlich.

Man ist daher genötigt, wiederum eine elektromagnetische Bremsung hinzuzufügen. Dadurch wird aber die Arbeitsweise des Zählers wesentlich verändert. Die induzierte gegenelektromotorische Kraft wird verhältnismäßig klein, und der Zähler arbeitet nunmehr im wesentlichen ebenso wie der vorher unter **6 a** beschriebene Wattstundenzähler; nur mit dem Unterschied, daß bei den Magnetmotorzählern der Ankerstrom dem Arbeitsstrom proportional ist, während der Spannungskreis ganz fehlt. Der wunde Punkt dieser Konstruktion liegt darin, daß der Ankerkreis einen verhältnismäßig kleinen Widerstand besitzt, und daß die Spannung an seinen Polen in der Regel nur Bruchteile eines Volt beträgt. Dadurch machen sich Widerstandsänderungen am Kollektor viel stärker geltend als bei den Wattstundenzählern, bei denen der Ankerkreis durch eine hohe Spannung erregt wird. Trotz sorgfältigster Konstruktionen kommt es daher häufiger vor, daß der Gang des Zählers durch Beschädigung des Kollektors unregelmäßig wird.

Es sind zahlreiche Versuche gemacht worden, um den erwähnten Uebelstand zu beseitigen; dazu gehört in erster Linie eine von der AEG ausgeführte Konstruktion (Fig. 8), bei welcher die Bürsten BB_1 um eine horizontale Achse D drehbar angeordnet sind, so daß sie je nach Lage des so zustande kommenden Hebels an verschiedenen Stellen des Kollektors K anliegen. Um den Hebel in einer bestimmten Lage festzuhalten, trägt einer seiner Arme eine vor den Anker geschaltete Spule S, die sich im Streufeld des Dauermagneten M befindet. Dadurch wird je nach Größe des Ankerstromes eine wechselnde Kraft auf die Spule ausgeübt und die Lage der Bürsten bestimmt. Um die Reibung, die sich vornehmlich bei kleinen Lasten geltend macht, zu kompensieren, ist eine Einrichtung getroffen, die auf folgender Ueberlegung beruht: Dreht man bei einem normalen Gleichstrommotor die Bürsten aus ihrer normalen Lage heraus, so wird dadurch bei unveränderter Ankerspannung die Tourenzahl des Ankers erhöht. Bei dem Magnetmotorzähler der AEG wird dieselbe Erscheinung dadurch hervorgerufen, daß man die Bürsten ohne Drehung längs

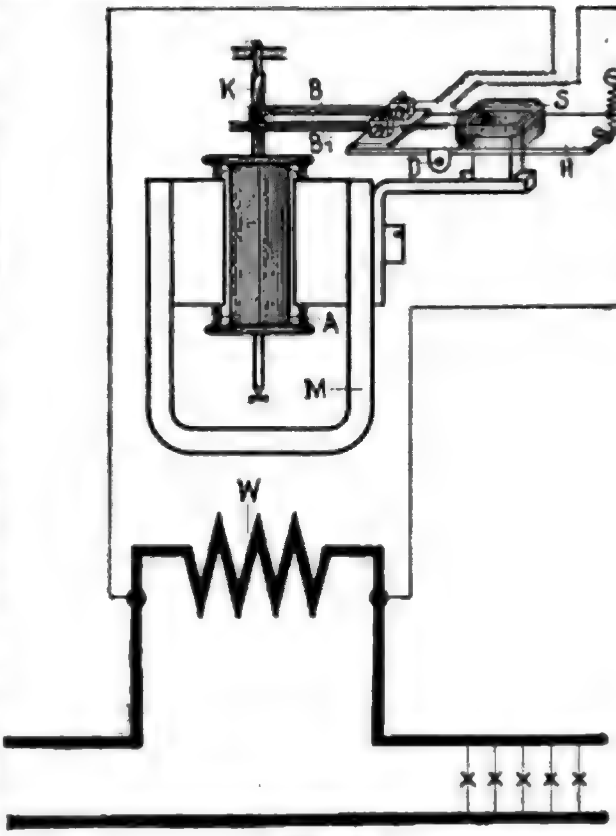


Fig. 8.

der Ankerachse verschiebt, aber den Kollektorlamellen eine spiralige Form gibt. Bei sehr kleinen Strombelastungen stellen sich die Bürsten so ein, daß sie an die spiralig geformten Stellen des Kollektors gelangen, so daß dadurch die Ankergeschwindigkeit erhöht wird.

7. Quecksilbermotorzähler. Es ist bereits mehrfach darauf hingewiesen, daß bei Motorzählern der Kollektor bei längerem Betrieb leicht die Veranlassung von erheblichen Störungen werden kann. Daher sind die Bestrebungen verständlich, die Anwendung des Kollektors zu vermeiden.

Ein Weg, dies zu erreichen, besteht darin, die Stromzuführung zum drehenden System durch Quecksilber zu bewirken. Der Anker eines solchen Zählers besteht aus einer Kupferscheibe, die in einer allseitig geschlossenen, mit Quecksilber gefüllten Dose schwimmt (Fig. 9). Die Scheibe ist emailliert; nur der Teil um den Mittelpunkt herum und der Rand der Scheibe sind von dem Emaillebelag freigelassen und amalgamiert, so daß hier der

Digitized by Google

Strom ein- und austreten kann. Dementsprechend erfolgen die Stromzuführungen des Arbeitsstromes im Mittelpunkte K_2 und an einer Stelle K_1 des Randes der Dose. Symmetrisch zur Drehachse der Scheibe sind zwei Dauermagnete MM angebracht, deren Pole $P_1P_2P_3P_4$ die Dose so umfassen, daß sich die Scheibe zwischen den Polen hindurchbewegt. Die Pole P_1P_2 des einen Magnetes liegen in der Richtung der Ein-

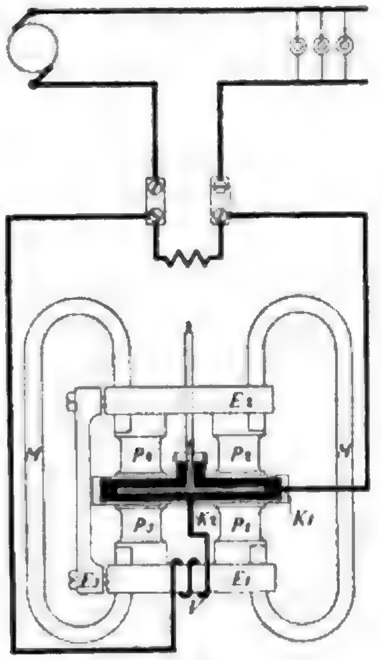


Fig. 9.

tritts- und Austrittsstelle des Arbeitsstromes, so daß letzterer zwischen den Polen des Magnetes hindurchfließt. Hierdurch kommt ein die Stärke des Arbeitsstromes antreibendes Drehmoment zustande. Andererseits erfährt die Scheibe bei der Bewegung, genau so, wie bei den vorher besprochenen Motorzählern eine Bremsung durch die Wirbelströme, die durch beide Dauermagnete induziert werden. Die Umdrehungszahl ist daher proportional der Zahl der durch die Scheibe geflossenen Elektrizitätsmenge; der Zähler gehört zur Klasse der Amperestundenzähler.

Es ist noch die Flüssigkeitsreibung des Quecksilbers zu berücksichtigen. Macht man Arbeitsmoment und Bremsmoment sehr groß, so kann die Flüssigkeitsreibung vernachlässigt werden. Besser ist es, sie zu kompensieren. Dies kann auf folgendem Wege geschehen. Man schickt den Arbeitsstrom durch eine Hilfsspule V, welche so geschaltet ist, daß dadurch die Pole des einen Dauermagneten verstärkt, die des anderen um nahezu denselben Betrag geschwächt werden. Die Bremsung erfährt daher praktisch keine Aenderung, wohl aber das Antriebsmoment, da dies nur von einem der beiden Dauermagneten verursacht wird. Ist also der Antriebsmagnet derjenige, der durch die Hilfsspule verstärkt wird, so erhält man dadurch ein mit der Stromstärke wachsendes passendes Zusatzmoment zur Kompensation der Reibung.

Wegen des Auftriebes der schwimmenden Scheibe ist die Lagerreibung außerordentlich klein; die Zähler haben daher, namentlich, wenn die eben besprochene Kompensation angebracht ist, die vorteilhafte Eigenschaft, daß sie schon bei sehr kleinen Stromstärken anlaufen. Ein weiterer Vorzug besteht darin, daß der Eigenverbrauch im Apparat sehr gering ist. Der Spannungsabfall im Zähler beträgt bei voller Stromstärke nur einige Zehntel Volt. Diesen Vorzügen steht ein Nachteil gegenüber, darin bestehend, daß zwar das antreibende Moment von der Temperatur nicht abhängig ist, wohl aber das Bremsmoment, und zwar aus denselben Gründen wie bei den Kollektorzählern. Daher nimmt mit wachsender Temperatur die Tourenzahl des Ankers zu. Dies trifft aber nur für Zähler bis zu etwa 5 Ampere zu, bei denen der gesamte Arbeitsstrom die Scheibe durchfließt.

Zähler für große Stromstärken erhalten einen Nebenschluß (s. Fig. 9) aus Temperaturkoeffizientenfreiem Material. Bei den Zählern mit Nebenschluß nimmt daher auch das antreibende Drehmoment mit wachsender Temperatur ab, und die Zählerangaben werden nahezu unabhängig von der Temperatur.

Einige Schwierigkeiten beim Aufbau und Gebrauch bereitet das Quecksilber. Vor allem ist darauf zu achten, daß keinerlei Luftbläschen in die Dose eindringen und sich etwa unter die Scheibe setzen. Andererseits müssen Vorrichtungen vorhanden sein, um die Dose während des Transportes quecksilberdicht abzuschließen. Diese Vorrichtungen werden meist so ausgeführt, daß man den Zähler von seinem Standort nicht abschrauben kann, ohne zuvor den Anker zu arretieren. Die Arretiervorrichtung schließt gleichzeitig durch eine Lederdichtung die Quecksilberdose.

Quecksilbermotorzähler findet man vornehmlich in Gegenden mit feuchtem Klima, wo Kollektoren erfahrungsgemäß ganz besonders stark leiden.

8. Oszillierende Zähler. Von der AEG ist ein dynamometrisch wirkender Zähler in den Handel gebracht worden, der wie ein Motorwattstundenzähler aufgebaut ist, nur mit dem Unterschied, daß der Anker statt sich in einer Richtung zu drehen, zwischen zwei Anschlägen hin- und herpendelt. Auf diese Weise ist der Kollektor entbehrlich, die Stromzuführungen zum Anker erfolgen durch biegsame Bänder. Die Anschläge betätigen zwei Relais, durch welche die

Digitized by Google

Stromrichtung in der Ankerspule umgedreht wird. Die Schaltung geht aus Figur 10 hervor. Die feststehenden Feldspulen F werden vom Betriebsstrom durchflossen. Der Spannungskreis, beginnend am Pol Z , besteht aus der Hilfsspule H, welche wie beim ge-

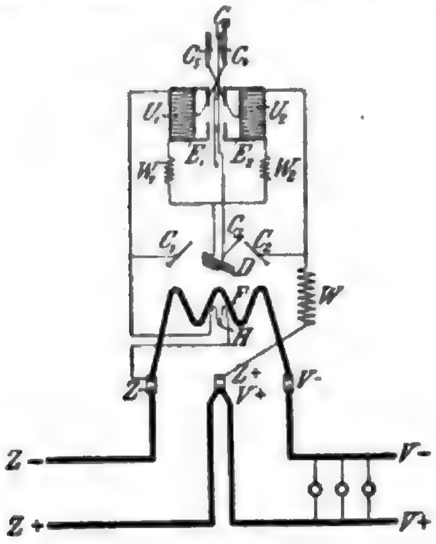


Fig. 10.

wöhnlichen Motorwattstundenzähler zur Kompensation der Reibung dient, den feststehenden Relaismagneten U_1U_2, zwischen denen zwei große Widerstände W_1W_2 liegen und dem Vorschaltwiderstand W; in +Z endet der Spannungskreis.

Die oszillierende Spannungsspule D, auf welche die Hauptstromspulen F wirken, zweigt zwischen den Widerständen W_1 und W_2 durch biegsame Bänder ab. Das andere Ende der Spule D trägt einen Arm C_3, der zwischen den Kontakten C_1 und C_2 hin und her pendelt. Gleichzeitig ist dasselbe Spulenende mit dem Anker C_6 der beiden Relais verbunden; C_6 legt sich gegen die Kontakte C_4 oder C_5, die mit den Mitten der Relais verbunden sind. Der Widerstand von D ist erheblich kleiner, als der von $W_1 + U_1$ oder $W_2 + U_2$. Liegt also C_6 an C_4, so wird die untere Hälfte von U_1 und W_1 durch D überbrückt. Da U_2 ganz, U_1 nur halb erregt ist, so legt sich C_6 um so fester an C_4. Der Anker beginnt sich durch die Wechselwirkung zwischen F und D zu drehen, bis der Arm C_3 an C_2 schlägt und dadurch die Relaisspule U_2 und den Widerstand W_2 kurz schließt. Die Folge davon ist, daß nunmehr U_1 überwiegt und der Relaismagnet C_6 nach C_5 hinüberkippt.

Ist dies geschehen, so ist dadurch gleichzeitig U_1 voll erregt und die Stromrichtung in D umgekehrt. Durch die Umkehr der auf den Anker wirkenden Kraftrichtung wird C_3 von C_2 abgehoben, und der Anker bewegt sich in entgegengesetzter Richtung, bis C_3 an C_1 stößt usf.

Während beim gewöhnlichen Motorzähler die zu messende elektrische Arbeit der Zahl der Umdrehungen proportional ist, ist sie bei diesen Zählern der Zahl der Oszillationen proportional. Das Zählwerk wird daher durch ein Rad angetrieben, welches durch einen am Relaisanker C_6 sitzenden Haken bei jeder Pendelung um einen Zahn vorwärts geschoben wird.

Diese Anordnung hat den weiteren Vorteil, daß die zur Bewegung des Zählwerks erforderliche Arbeit nicht vom Zähleranker, sondern von den Relaismagneten aufgebracht wird. Durch die Kontakte $C_1C_2C_4C_5$ werden immer nur Teile des Spannungskreises kurz geschlossen, nie wird dabei ein Stromkreis vollständig ausgeschaltet. Dadurch wird erreicht, daß die Funkenbildung an den Kontakten möglichst klein gemacht wird. Auf die Ausbildung und Reinhaltung der Kontakte ist die größte Sorgfalt zu verwenden.

9. **Induktionszähler.** Induktionszähler sind Motorzähler, die nur zur Messung von Wechselstromarbeit brauchbar sind. Sie sind dadurch ausgezeichnet, daß die im Anker fließenden Ströme durch gegenseitige Induktion mit feststehenden Spulen zustande kommen; der Anker wird also bei Verwendung von Gleichstrom stromlos bleiben, ein Drehmoment könnte in diesem Fall nicht auftreten. Der Vorteil gegenüber den Gleichstrommotorzählern besteht darin, daß der Anker keine Stromzuführungen nötig hat, daß also der empfindlichste Teil des Gleichstromzählers, der Kollektor, wegfällt, daß der Anker keine besondere Wickelung braucht, sondern nur aus einer Metallscheibe oder einem Metallzylinder besteht. Das hat wieder zur Folge, daß das Ankergewicht sehr klein gemacht werden kann, so klein, daß eine Arretierung während des Transportes in der Regel entbehrlich ist. Die Lagerreibung wird infolge des geringen Ankergewichtes so herabgesetzt, daß sie als klein gegen die Luft- und Zählwerksreibung angesehen werden kann.

Diesen wesentlichen Vorzügen steht gegenüber, daß die Angaben von der Frequenz des Wechselstromes abhängig sein müssen, da sich die Stärke der induzierten Ströme im allgemeinen mit der Frequenz ändert. Sache des Konstrukteurs ist es, die Abmessungen und Wickelungsdaten so zu wählen, daß die Abhängigkeit der Zählerangaben von der Frequenz in gewissen Bereichen möglichst klein wird. Damit ist den Anforderungen, welche die Praxis stellt, vollständig Genüge getan. Denn in der Praxis wird fast ausschließlich mit konstanten oder nahezu konstanten Frequenzen gearbeitet. Die Apparate werden nun so konstruiert, daß sie bei der normalen Frequenz gegen die

Digitized by Google

unvermeidlichen Frequenzschwankungen von einigen Prozenten nahezu unempfindlich sind.

Die Induktionszähler benutzen ausschließlich das von Ferraris entdeckte Drehfeldprinzip (vgl. den Artikel „Elektrische Leistung"), und zwar in folgender Form. Eine drehbare Kupferscheibe wird von den magnetischen Feldern zweier Spulen oder zweier Spulensysteme durchsetzt, deren Achsen zur Kupferscheibe senkrecht stehen. Es seien die magnetischen Felder der beiden Spulensysteme Wechselfelder von der Stärke H_E und H_J (Fig. 11). Wird die Phasenverschiebung zwischen den Wechselfeldern mit

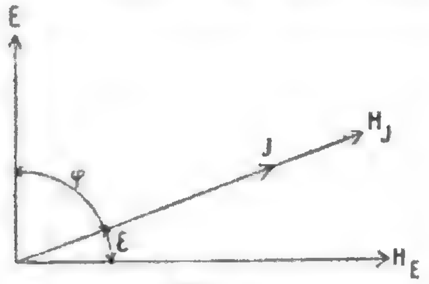


Fig. 11.

ε bezeichnet, so entsteht durch die mechanische Kraftwirkung der magnetischen Felder auf die in der Scheibe induzierten Ströme ein Drehmoment, das proportional

$$H_E H_J \sin \varepsilon$$

gesetzt werden kann. Man erregt nun das eine Spulensystem durch die Betriebsspannung E, das andere durch den Betriebsstrom J, so daß die magnetischen Felder H_E, H_J der Spannung E und dem Strom J nahezu proportional sind. Während man es aber so einrichtet, daß H_J mit J nahezu in Phase ist, muß H_E gegen E in der Phase um 90° verschoben werden. Beträgt die Phasenverschiebung zwischen E und J φ Grad, so wird dadurch

$$\varepsilon = 90^0 - \varphi$$

und das antreibende Drehmoment wird

$$EJ \cos \varphi$$

d. h. proportional der Leistung des Wechselstromes.

Es wird wiederum zur Bremsung ein Dauermagnet angeordnet, zwischen dessen Polen sich die Scheibe dreht; d. h. die als Anker dienende Antriebsscheibe und die Bremsscheibe sind identisch. Bei Induktionszählern pflegen aber die Felder H_E und H_J so stark zu sein, daß auch sie bei der Bewegung der Scheibe eine Bremsung verursachen. Man muß also das Bremsmoment proportional

$$v(a + bE^2 + cJ^2)$$

setzen, wo v die Geschwindigkeit der Scheibe, a, b, c, Konstanten bedeuten. Die Angaben des Zählers werden somit proportional

$$\frac{EJ \cos \varphi}{a + bE^2 + cJ^2}$$

d. h. nicht streng proportional der Leistung des Wechselstromes. Um den störenden Einfluß der Glieder im Nenner möglichst zu verkleinern, muß die Bremsung des Dauermagneten (a) überwiegen. Weiter ist es zweckmäßig, die Bremsung durch den Spannungsmagneten (bE^2) größer zu machen, als die durch den Strommagneten (cJ^2), weil man es in der Praxis zwar mit einigermaßen konstanten Spannungen, aber stark veränderlichen Werten des effektiven Stromes zu tun hat. Man pflegt daher die Hauptstromspulen mit schlecht eisengeschlossenen Kernen zu bauen; damit kommt man auch der oben aufgestellten Forderung entgegen, daß H_J mit J nahezu phasengleich sein soll. Immerhin pflegt die Bremsung durch den Strommagneten so groß zu sein, daß die Induktionszähler eine etwas gekrümmte Eichkurve besitzen. Mit wachsender Stromstärke pflegt der Induktionszähler größer und größer werdende negative Fehler aufzuweisen.

Es ist noch zu erörtern, wie es einzurichten ist, daß das Feld um 90° in der Phase gegen die Spannung E verschoben ist. Es

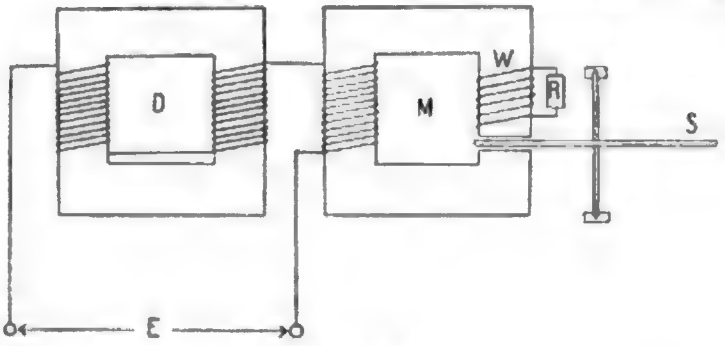


Fig. 12.

sind dafür sehr viele und verschiedenartige Schaltungen angegeben worden. Sie sind fast alle wieder im praktischen Gebrauch verschwunden, bis auf eine von Belfield herrührende.

Die Betriebsspannung wird durch eine Drosselspule D (Fig. 12) und einen Elektromagneten M geschlossen, der an einer Stelle aufgeschnitten ist. Durch den Schlitz bewegt sich die Zählerscheibe S, d. h. im Luftraum des Schlitzes ist das Feld H_E. In der Nähe des Schlitzes ist ein aus wenigen Windungen bestehende sekundäre Wickelung W aufgebracht, die durch einen regulierbaren Widerstand R kurz geschlossen ist. Denken wir uns zunächst die sekundäre Wickelung geöffnet, so ist der Spannungs-

Digitized by Google

strom J_s gegen E in der Phase stark nach rückwärts verschoben. In der sekundären Wickelung wird eine EMK E_2 induziert, welche gegen J_s um 90° nach rückwärts verschoben ist und mit J_s proportional verläuft. Wird jetzt die sekundäre Wickelung geschlossen, so hat die sekundäre induzierte EMK E_2 (Fig. 13) den Widerstand r_2 und die Selbstinduktion S_2 des Sekundärkreises zu überwinden. Im Diagramm bilden also E_2, $J_2 r_2$ und $J_2 \omega S_2$ ein rechtwinkeliges Dreieck. Da die sekundären Windungen

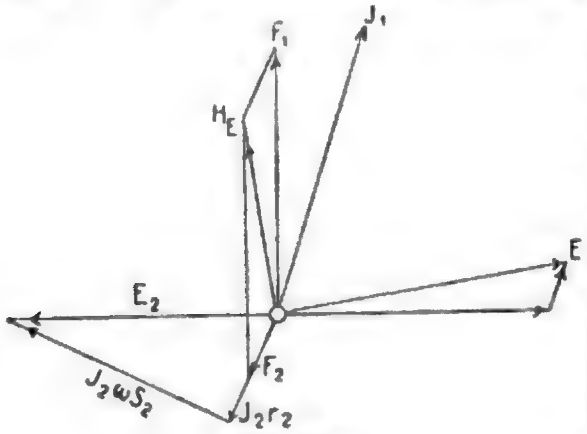


Fig. 13.

nur ein sehr kurzes Stück des Eisenkernes bedecken und in der Nähe des Luftspaltes angeordnet sind, so ist die Streuung der von J_2 herrührenden Kraftlinien sehr groß; nur ein vernachlässigbar kleiner Bruchteil wird in die primäre Wickelung eintreten, d. h. das Diagramm des primären Kreises wird nur unwesentlich durch J_2 geändert. Dagegen wird der Luftspalt von der Resultierenden der primären und der sekundären Felder durchsetzt. Das primäre Feld F_1, welches größtenteils in Eisen verläuft, ist gegen den primären Strom J_1 ein wenig nach rückwärts verschoben, das sekundäre Feld F_2, welches vornehmlich in Luft verläuft, ist mit J_1 als gleichphasig anzusehen. Beide setzen sich zum resultierenden Felde H_E zusammen. Wie man erkennt, ist H_E gegen das primäre Feld nach rückwärts verschoben. Durch Regulieren von r_2 kann die Phase von J_2 und damit von H_E gedreht werden. Es ist leicht einzusehen, daß es möglich ist, H_E auf E senkrecht zu stellen, und das ist die Bedingung, die das Spannungsfeld erfüllen muß. Die Regulierung durch den Widerstand r_2 ist überaus einfach.

Drehstromzähler der Induktionstype werden auf Grund der Formeln für die Leistungsberechnung von Drehstromsystemen konstruiert, Fig. 14 (vgl. auch den Art. „Elektrische Leistung"). Man läßt auf die Scheibe zwei einander gleich gebaute Magnetsysteme wirken, welche die Belfieldsche Schaltung besitzen. Die Hauptstromwickelungen werden in zwei der Hauptleitungen des Drehstromsystems eingeschaltet, die Spannungsspulen zwischen je eine dieser Hauptleitungen und die dritte Hauptleitung. Dazu kommt natürlich der Bremsmagnet. Eine fehlerhafte Arbeitsweise des Zählers kann dadurch zustande kommen, daß Kraftlinien des einen Magnetsystems in das andere hineinstreuen. Es ist Aufgabe des Konstrukteurs, die Anordnung und die Abmessungen so zu treffen, daß dieser Fehler, der sich nicht ganz vermeiden läßt, auf ein möglichst geringes Maß beschränkt bleibt. Am vollkommensten gelingt es, wenn man an der Drehachse zwei Scheiben übereinander anordnet und auf jede der Scheiben nur 1 Magnetsystem wirken läßt. Freilich wird dieser Vorzug mit einer erheblichen Vermehrung des Ankergewichtes erkauft.

Noch schwieriger werden die Verhältnisse, wenn man einen Zähler für ein Drehstromsystem mit Nulleiter bauen will. Hier sind nach den Formeln für die Leistungsmessung drei Systeme notwendig. Um die gegenseitige Beeinflussung der drei Systeme nach Möglichkeit zu vermeiden, stattet man den Anker mit zwei oder gar drei Scheiben aus.

Kurz erwähnt sei, daß man Einphasenzähler für induktionslose Last, Drehstromzähler für gleichbelastete Zweige der drei Zweige des Drehstromsystems und Vierleiterzähler mit vereinfachten Schaltungen konstruiert hat. Diese Apparate sind nicht zu empfehlen, weil die Voraussetzungen, unter denen sie konstruiert sind, in den seltensten Fällen zutreffen.

10. Strom- und Spannungswandler. Wir sahen, daß die Leistungsmessung von Wechselstromkreisen Schwierigkeiten bereitet, wenn es sich um hohe Spannungen oder große Stromstärken handelt. Es sind hierfür die Meßwandler in die Meßtechnik eingeführt worden.

Die Meßtransformatoren oder Meßwandler bestehen aus einem aus lamelliertem Eisen aufgebauten ringförmigen Körper, auf dem zwei elektrisch voneinander getrennte Kupferwickelungen angebracht sind, die man als primäre und sekundäre Wickelungen bezeichnet.

Wir stellen uns zunächst der Einfachheit halber vor, daß die Wickelungen des Meßwandlers einen vernachlässigbar kleinen Widerstand haben und daß auch sein Eisen bei der Ummagnetisierung keine Energie verzehrt. n_1 sei die primäre, n_2 die sekundäre Windungszahl, $n_1 > n_2$. Es werde die Wechselspannung E_1 an die primäre Wickelung gelegt, so wird durch den in dieser Wickelung entstehenden Strom das Eisen einer im Takte der Spannung periodisch wechselnden Magnetisierung unterworfen. Wird mit

φ der Augenblickswert des magnetischen Induktionsflusses bezeichnet, so wird durch diesen in der Wickelung eine elektromotorische Gegenkraft induziert, die gleich

$$n_1 \frac{d\varphi}{dt}$$

ist. D. h. es ist:

$$E_1 = n_1 \frac{d\varphi}{dt}.$$

Aber auch in der sekundären Wickelung wird eine EMK induziert, und zwar vom Betrage

$$E_s = n_2 \frac{d\varphi}{dt}.$$

Mithin wird:

$$E_1 : E_s = n_1 : n_2$$

oder die primäre Spannung verhält sich zur sekundären, wie die Windungszahlen der Spulen.

Man kann daher durch geeignete Wahl des Uebersetzungsverhältnisses $n_1 : n_2$ eine Hochspannung E auf eine Spannung E_s reduzieren, welche für die üblichen Meßapparate bequem ist, z. B.

$$E = 3000 \text{ V.} \quad E_s = 150 \text{ V.}$$
$$n_1 : n_2 = 20 : 1.$$

Die sekundäre Spannung hat außerdem dieselbe (bezw. entgegengesetzte) Phase, wie die primäre.

Wird andererseits die sekundäre Wickelung kurz geschlossen, so kann in ihr infolge der induzierten EMK ein Strom zustandekommen. Da der Transformator als verlustlos arbeitend vorausgesetzt wird, so steigt die sekundäre Stromstärke so lange, bis das resultierende Feld, das primärer und sekundärer Strom zusammen erzeugen, verschwindet. Ist J_p der primäre, J_s der sekundäre Kurzschlußstrom, so wird also

$$n_1 J_p = n_2 J_s$$

oder

$$J_p : J_s = n_2 : n_1.$$

Die Phasen der Ströme sind einander entgegengesetzt. In dieser Anwendung wird der Transformator als Stromwandler bezeichnet. Durch Einschalten von einem oder mehreren in Reihe geschaltenen Meßapparaten von verschwindend kleinem Widerstand in den Sekundärkreis kann jede beliebige primäre Stromstärke bei geeignetem Uebersetzungsverhältnis gemessen werden.

Ein nicht zu unterschätzender Vorteil wird bei der Anwendung von Meßwandlern dadurch erreicht, daß auf diese Weise die Meßapparate selber von Hochspannung führenden Leitungen getrennt werden können. Daher kommt es, daß man Stromwandler nicht nur bei der Messung großer Stromstärken anwendet, sondern auch nur zur Trennung vom Hochspannungskreise, während das Uebersetzungsverhältnis 1:1 gewählt ist.

Figur 15 zeigt eine Anordnung, wie man sie häufig in Zentralen findet. An den Spannungswandler W_E sind der Spannungsmesser V und die Spannungskreise vom Leistungsmesser L und Zähler Z in Parallelschaltung angeschlossen; an den Stromwandler W_J in Reihe der Strommesser A und die Hauptstromspulen vom Leistungsmesser L und Zähler Z.

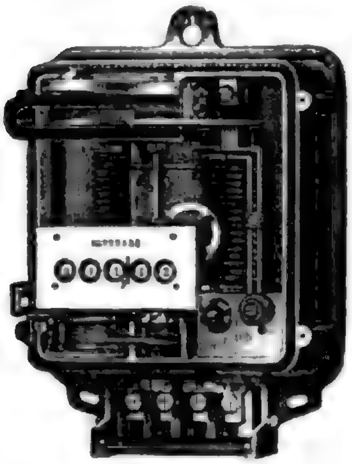


Fig. 14.

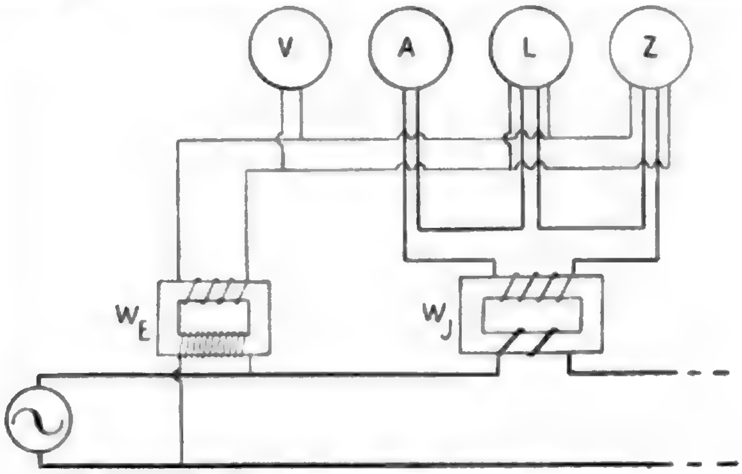


Fig. 15.

Die bisherigen Auseinandersetzungen erfahren eine Modifikation dadurch, daß die Verluste der Meßwandler nicht vernachlässigbar klein sind. Dies zeigt sich darin, daß je nach der Größe der sekundären Belastung die Uebersetzungsverhältnisse von ihrem Sollwert um einen gewissen prozentischen Betrag p_e bezw. p_i abweichen und auch die Phasen sich um einen gewissen Winkel ε_e bezw. ε_i drehen (Fig. 16). Diese Winkel mögen positiv gerechnet werden, wenn die primären Größen zeitlich hinter den sekundären liegen. Aus Kurven oder Tabellen, die den Meßwandlern beigegeben werden, können für jede sekundäre Be-

lastung die Werte der p und E entnommen werden. Ist L_s die in den sekundären Kreisen gemessene Leistung, so ist die gesuchte Gesamtleistung

$$L = L_s(1+p_e)(1+p_i)(1-(\varepsilon_e-\varepsilon_i)\operatorname{tg}\varphi).$$

Bei guten Meßwandlern bleiben die p unter 1 %, die Winkel ε unter 1°; in der Formel sind die Winkel in Bogenmaß einzusetzen.

Wir sahen, daß es vorteilhaft ist, wenn die Meßwandler möglichst verlustlos und streuungslos arbeiten. Aus diesem Grunde

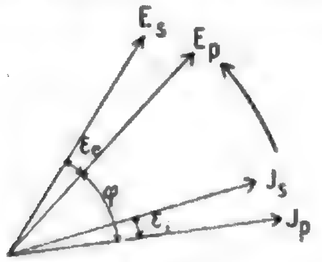


Fig. 16.

müssen gute Meßwandler aus sogenanntem legiertem Blech hergestellt werden (s. Art. „Magnetische Eigenschaften der Stoffe"). Ferner ist es zweckmäßig, um Streuung und Magnetisierungsstrom herabzusetzen, daß der Eisenpfad möglichst durch keine Stoßfuge unterbrochen wird. Bei guten Meßwandlern werden daher die ringförmigen Bleche aus einem Stück gestanzt und übereinander geschichtet. Freilich ist dann, wenn man nicht besondere Vorrichtungen anwendet, das Wickeln etwas unbequem. Um die Streuung möglichst gering zu machen, müssen primäre und sekundäre Wickelung übereinander angeordnet werden. Da die sekundäre Wickelung keine hohen Spannungen gegen Erde hat, so wird sie in der Regel innen auf dem Eisenkern angeordnet. Darüber wird imprägniertes Papier gewickelt, welches so stark sein muß, daß es mit der nötigen Sicherheit die Betriebsspannung dauernd aushält, ohne durchschlagen zu werden. Darüber kommt die primäre Wickelung. Bei sehr hohen Spannungen wird der Transformator mit gutem, durchaus trockenem Mineralöl gefüllt, doch ist durch geeigneten Aufbau der isolierenden Zwischenschicht möglich, das Oel zu vermeiden. Siemens & Halske z. B. baut Meßwandler für Spannungen bis 60000 V. ohne Verwendung von Oel.

Literatur. *A. Königswerther, Elektrizitätszähler. — R. Ziegenberg, Die Elektrizitätszähler. Handbuch der Elektrotechnik. Bd. 2, Abt. 6. Leipzig 1908. — E. Bohnenstengel, Elektrizitätszähler, Konstruktionen. Karlsruhe 1909. — K. Norden, Elektrolytische Zähler. Halle 1908. — Bekanntmachungen über Prüfungen und Beglaubigungen durch die elektrischen Prüfämter, herausgegeben von der Phys. Techn. Reichsanstalt, Elektrotechn. Zeitschrift und deren Sonderdrucke. Berlin.*

E. Orlich.

Elektrisches Feld.

1. Einleitender Abschnitt. Fernwirkung und Nahewirkung. I. Das elektrische Feld im Aether: A. Definitionen und allgemeine Eigenschaften: 2. Richtung des elektrischen Feldes. Feldlinien. 3. Methoden zur Demonstration der Feldrichtung. 4. Feldstärke. 5. Elektrische Spannung. B. Gleichgewicht des elektrischen Feldes: 6. Bedingung für das Spannungsgleichgewicht im elektrischen Feld. 7. Gleichgewicht eines elektrischen Feldes, welches Leiter enthält; Potential. 8. Einheit der Spannung oder Potentialdifferenz. 9. Spannungsmessung. 10. Potential eines geladenen Leiters. Kapazität. 11. Potential und Kapazität einer geladenen Kugel in elektrostatischen Einheiten. 12. Ungleichmäßige Verteilung. Spitzenwirkung. 13. Influenzwirkung des elektrischen Feldes auf Leiter. Ausmessung des elektrischen Feldes durch Tropfelektroden. 14. Der elektrische Kondensator. C. Energie des elektrischen Feldes. 15. Bewegung einer Ladung in einem elektrischen Felde. 16. Energie des elektrischen Feldes um einen geladenen Leiter. 17. Verteilung der Energie im elektrischen Felde. Energiedichte. II. Das elektrische Feld in der Materie. 18. Die elektrische Erregung des Aethers. 19. Die Polarisation des materiellen Dielektrikums im elektrischen Feld. 20. Ladung und Feld im materieerfüllten Kondensator. Erweiterung des Coulombschen Gesetzes. 21. Verhalten der Grenzfläche von Materie gegen Vakuum. 22. Energie des elektrischen Feldes im Dielektrikum. Bewegung eines Isolators im elektrischen Feld. 23. Dielektrischer Widerstand. 24. Allgemeine Feldbedingungen. Elektrodynamisches Feld.

1. Einleitender Abschnitt. Fernwirkung und Nahewirkung. Die Kepplerschen Gesetze der Planetenbewegung ließen die Gravitationswirkung der Massen so erscheinen als ob diese eine direkte Fernwirkung durch den leeren einflußlosen Raum sei. Die formale Uebereinstimmung des Newtonschen Gravitationsgesetzes mit dem Coulombschen Grundgesetz für die Anziehungs- und Abstoßungskraft zwischen elektrischen Ladungen ließ, obwohl Newton selbst auf das Unbefriedigende, das eine Fernwirkungstheorie an sich hat, hingewiesen hatte, ähnliche Anschauungen auch für die elektrische Kraft erstehen. Die zwischen zwei elektrisch geladenen Körpern wirkende Kraft sollte danach sich zeitlos durch den einflußlosen Raum übertragen, d. h. die elektrische Wirkung sollte momentan mit dem Auftreten zweier Ladungen vorhanden sein und momentan mit dem Verschwinden einer der Ladungen aufhören. Die Lossage

Digitized by Google

von solcher Anschauung ging von England aus. **Faraday** war der erste, welcher, das Ungenügende einer solchen Auffassung einsehend, sich eine neue, vollkommen andersartige Vorstellung von dem Wesen der Kraftwirkung bildete. Er sah dieselbe als veranlaßt an durch gewisse Zustandsänderungen in einem hypothetischen Medium, welches als überall, auch im äußersten Vakuum vorhanden und alle Körper durchdringend angesehen werden muß. Dieser sogenannte Aether soll, in eine Art Spannungszustand versetzt, die elektrischen Kraftwirkungen hervorrufen, deren Ausbreitung nun nicht mehr als zeitlos angesehen zu werden braucht. Das Wesentliche an der Faradayschen Anschauung im Gegensatz zu der Theorie der reinen Fernwirkung ist, daß dem zwischen den Ladungen befindlichen Medium eine wichtige Rolle zuerteilt wird. Nicht mehr der die Ladungen tragende Leiter sondern der Isolator wird als der eigentliche Sitz der elektrischen Kräfte angesehen. Auf dem Boden dieser Nahewirkungstheorie stehend, machte Faraday eine große Reihe der glänzendsten Entdeckungen. Trotzdem dauerte es geraume Zeit, bis seine neuen Gedanken sich gegen die von den hervorragendsten damaligen Elektrikern vertretenen Anschauungen durchsetzten. Erst James Clerk Maxwell, der die genialen Ideen Faradays in exakte mathematische Form brachte, und Heinrich Hertz durch seine bahnbrechenden experimentellen Untersuchungen über die Ausbreitung der elektrischen Kraft bewiesen endgültig die Ueberlegenheit der Nahewirkungs- über die Fernwirkungstheorie.

I. Das elektrische Feld im Aether.

A. Definitionen und allgemeine Eigenschaften.

2. Richtung des elektrischen Feldes. Feldlinien. Ein elektrisch geladener Körper versetzt den ihn umgebenden Raum, dem man als physikalischem Objekt auch den Namen Aether beilegt, in einen besonderen Spannungszustand. Den Bereich dieses modifizierten Raumes nennt man elektrisches Feld. Zwei Größen sind es, welche ein elektrisches Feld charakterisieren, seine Richtung im Raume und seine Stärke oder Intensität, für welche ein Maß festzulegen ist. Man bezeichnet als Feldrichtung diejenige, in welcher sich ein positiv geladener Körper, z. B. ein mit Seide geriebenes Glaskügelchen, zu bewegen strebt. Zieht man im Raume um einen geladenen Körper zusammenhängende Kurven, die überall die Feldrichtung haben, so erhält man die sogenannten Feldlinien oder Kraftlinien. Ein frei bewegliches, positiv geladenes Teilchen bewegt sich im elektrischen Feld längs einer solchen Linie, ein negativ geladenes Teilchen durchläuft sie im umgekehrten Sinne. Die Kraftlinien eines elektrischen Feldes gehen aus von positiven und endigen an negativen Ladungen.

3. Methoden zur Demonstration der Feldrichtung. Ein bequemes Mittel zur Feststellung der Richtung des elektrischen Feldes um einen geladenen Körper bietet der sogenannte elektrische Kompaß, dessen Name bereits die Analogie zur Verwendung der Magnetnadel andeutet. Er besteht aus einem Stäbchen isolierenden Materials (Bernstein), das auf einer Nadelspitze drehbar ist, und an dessen Enden leichte Kugeln aus leitendem Material (Kork) befestigt sind. Die eine Kugel wird positiv, die andere negativ geladen. Ein leichter am Stäbchen befestigter Papierpfeil weist mit der Spitze nach der positiven Kugel hin. Der Kompaß stellt sich mit seiner Längsrichtung überall so in die Richtung des elektrischen Feldes ein, daß diese vom Pfeil angezeigt wird.

Wenn man auf den Unterschied von Richtung und Gegenrichtung verzichtet, so kann man den beschriebenen Kompaß einfacher durch ein an einem Seidenfaden aufgehängtes leichtes Stäbchen aus leitendem Material (Kork, angefeuchtes Holz) ersetzen, welches infolge von Influenzwirkung durch das Feld selbst zu einem polar erregten Kompaß wird.

Der viel angewendeten, für Projektionszwecke sehr brauchbaren Methode, magnetische Felder durch die Anordnung von Eisenfeilspänen längs der Feldlinien zu demonstrieren, analog ist endlich das von Seddig angegebene Verfahren, den Verlauf der elektrischen Feldlinien durch halbleitendes grobes Pulver sichtbar zu machen. Aus mehreren Gründen hat sich hierfür zerriebener Rutil als besonders geeignet erwiesen. Das Pulver wird auf gut getrocknete Glasplatten zwischen die mit einer kleinen Influenzmaschine geladenen Leiter gestreut, welche in Form von Blechstücken verschiedener Gestalt auf die Glasplatten geklebt werden.

4. Feldstärke oder Intensität des elektrischen Feldes. Die Feldstärke oder Intensität des elektrischen Feldes, d. i. die Größe des Spannungszustandes an einer Stelle im Aether, wird durch die Kraft gemessen, welche der Aether an der betreffenden Stelle auf die Ladungseinheit ausübt. Wird die Kraft in absoluten Einheiten, Dynen, gezählt und als Ladungseinheit die nach dem Coulombschen Gesetz definierte absolute C. G. S.-Einheit gewählt, so erhält man den Wert der Feldstärke im absoluten elektrostatischen Maßsystem.

Digitized by Google

Zeichnet man das Kraftlinienbild eines elektrischen Feldes um einen geladenen Körper, so erkennt man, daß in der Nähe desselben, wo das elektrische Feld stärker ist, die Feldlinien dichter verlaufen als in größerer Entfernung, wo das Feld schwächer ist. Die graphische Darstellung eines elektrischen Feldes durch Kraftlinien gibt also Aufschluß sowohl über die Richtung als auch über die Stärke desselben. Man kann Festsetzungen für die bildliche Darstellung treffen, daß man aus derselben die Feldstärke numerisch abzulesen imstande ist. Im räumlichen Kraftlinienmodell sind dazu die Linien so einzutragen, daß sie eine zu ihnen senkrechte Flächeneinheit in einer Anzahl durchsetzen, die zur Feldstärke in einem bestimmten numerischen Verhältnis steht.

5. Elektrische Spannung. Es ist schwierig, ja in mancher Hinsicht unmöglich, für die Spannung des Aethers im elektrischen Feld ein mechanisches Analogon zu finden. Die elektrische Spannung in einem Draht beispielsweise hat den Charakter einer sogenannten Tensorgröße. Man kann an ihr nicht Richtung von Gegenrichtung unterscheiden, sie wird vielmehr durch zwei an den Enden wirkende, entgegengesetzt gerichtete Kräfte hervorgebracht. Die elastische Spannung ist denn auch völlig ungeeignet zum Vergleich mit der elektrischen Spannung in Aether, welche eine Vektorgröße mit einer bestimmten Richtung ist. Ein in vielen Punkten recht treffendes Bild gibt der Fall der Strömung einer inkompressiblen Flüssigkeit, die man, da im ruhenden elektrischen Feld keinerlei Bewegung stattfindet, sich etwa plötzlich erstarrt denken kann. Die Differentialgleichungen des elektrischen Feldes weisen darum auch große formale Uebereinstimmungen mit denen der Hydrodynamik auf. Die Strömungsfäden geben das Analogon zu den Kraftlinien; sie gehen aus von Zufuhrstellen, von Quellen der Flüssigkeit, die vergleichbar sind mit positiven Ladungen, und enden an Abflußstellen, die negative Ladungen darstellen. Die Druckverteilung in der Flüssigkeit entspricht dem Bilde der elektrischen Spannung im Aether. Die Druckdifferenz zwischen zwei in der Stömungsrichtung um die Längeneinheit entfernten Punkten gibt ein Maß für das Strömungsfeld wie die Spannung zwischen zwei in der Feldrichtung um 1 cm entfernten Punkten für das elektrische Feld. Bezeichnet man die Feldstärke mit dem Buchstaben $\mathfrak{E}$, die Spannung zwischen zwei in der Feldrichtung um die Strecke ds entfernten Punkten 1 und 2 mit V_{12}, so ist

$$V_{12} = \mathfrak{E} ds.$$

Die Strecke ds muß dabei in einem örtlich veränderlichen Feld so klein gewählt werden, daß $\mathfrak{E}$ sich auf ihr noch nicht merklich ändert. Liegen die Punkte 1 und 2 weiter auseinander, so erhält man die Gesamtspannung längs einer sie verbindenden Kraftlinie durch Integration. Es ist dann das Integral

$$V_{12} = \int \mathfrak{E} ds$$

über die betreffende Feldlinie zu erstrecken.

Die Beziehung zwischen Feldstärke und Spannung in einem elektrischen Feld ist gemäß ersterer Gleichung durch den Satz gegeben:

Elektrische Feldstärke = Spannung pro Längeneinheit in Feldrichtung.

Wie senkrecht zu den Strömungslinien keine Strömung stattfindet, so ist auch senkrecht zu den Feldlinien kein Feld, also keine Spannung vorhanden. In schräger Richtung zu den Feldlinien wirkt nur die Spannungskomponente, die sich durch Multiplikation der Spannung mit dem cos des Richtungswinkels ergibt, also für senkrechte Richtung Null wird. Soll das die Gesamtspannung zwischen zwei Punkten 1 und 2 darstellende Integral längs einer beliebigen Verbindungslinie gebildet werden, die nicht eine Kraftlinie ist, also gegen die Feldrichtung Neigungen aufweist, so ist für $\mathfrak{E}$ die in Richtung des Wegelements ds fallende Komponente $\mathfrak{E}_s$ zu setzen. Es ist also die Gesamtspannung zwischen zwei Punkten 1 und 2 längs einer beliebigen Verbindungslinie s gegeben durch das über die Linie zu erstreckende Integral:

$$V_{12} = \int \mathfrak{E}_s ds$$

Da $\mathfrak{E}_s$ die Kraft ist, welche der Aether auf die Einheitsladung in der Richtung des Wegelementes ds ausübt, so ist demnach die Spannung zwischen den beiden Punkten der Arbeit gleich, die vom Aether geleistet wird, wenn dem elektrischen Antrieb folgend die Einheitsladung vom einen zum anderen Punkt sich bewegt.

B. Gleichgewicht des elektrischen Feldes.

6. Bedingung für das Spannungsgleichgewicht im elektrischen Feld. Wie die elastischen Spannungen in einem greifbaren Körper nur unter bestimmten Bedingungen im Gleichgewicht sind, und solange diese Bedingungen nicht erfüllt sind, unter Arbeitsleistung der elastischen Kräfte innere Bewegungen eintreten, bis das Spannungsgleichgewicht hergestellt ist und dabei die innere Energie des Körpers ihren kleinsten Wert angenommen hat, so ist ein elektrisches Feld auch nur bei einer bestimmten Verteilung der elektrischen Spannungen im Gleichgewicht, bei der die Energie des Feldes

Digitized by Google

den Minimalwert hat. Die Gleichgewichtsbedingung ist die folgende:

Zwischen zwei Punkten des elektrischen Feldes ist die Gesamtspannung unabhängig vom Wege, längs welchem sie gemessen wird.

Wäre dem nicht so, und wir greifen zwei die Punkte 1 und 2 verbindende Kurven heraus, längs denen gemessen die Gesamtspannung zwischen 1 und 2 die verschiedenen Werte $V < V'$ hat, so muß die Bewegung eines ins Feld gebrachten geladenen Teilchens von 1 auf der ersten Kurve nach 2 und auf der zweiten Kurve wieder zurück nach 1, also eine Bewegung auf geschlossener Bahn, von einer Arbeitsleistung $V - V'$ begleitet sein. Da sonst keinerlei Veränderung eingetreten ist, muß die Arbeit vom Aether geleistet und von einer Veränderung des elektrischen Feldes begleitet sein. Wird der Vorgang wiederholt, so muß solange eine Aenderung der Feldverteilung eintreten, bis bei dem Vorgang keine Arbeit mehr geleistet wird. bis also $V = V'$ geworden ist. Da die in der Natur von selbst eintretenden Bewegungen stets im Sinne einer Arbeitsleistung des Systems, einer Abnahme seiner Energie verlaufen, so wird die gedachte Feldveränderung von selbst so lange vor sich gehen, bis keine weitere Energieabnahme mehr erfolgt:

Die elektrischen Spannungen im Aether sind dann im Gleichgewicht, wenn die Energie des elektrischen Feldes den kleinsten Wert hat. Die Verteilung der Feldlinien im Gleichgewicht ist so, daß die Feldenergie kleiner ist als bei jeder anderen Verteilung.

Die Arbeitsleistung bei jeder Bewegung einer Ladung längs einer geschlossenen Bahn in einem im Gleichgewicht befindlichen elektrischen Feld muß verschwinden, d. h. es muß über jede geschlossene Kurve integriert

$$\int \mathfrak{E}_s \, ds = 0$$

sein.

7. Gleichgewicht eines elektrischen Feldes, welches Leiter enthält. Potential. Ohne daß zunächst auf die Natur der Elektrizitätsleitung eingegangen zu werden brauchte, kann ein Leiter vorläufig als ein Körper charakterisiert werden, der im elektrischen Felde die Rolle eines Störenfrieds spielt, insofern als er in sich kein elektrisches Feld im Gleichgewicht duldet. Wie in einer äußeren Kräften entzogenen Flüssigkeit durch Strömungen jede Druckdifferenz ausgeglichen wird, bis der Ruhezustand erreicht ist, so treten im Leiter unter der Wirkung elektrischer Spannungen Bewegungen von Elektrizität ein, bis im Falle des Gleichgewichts das elektrische Feld im Leiter vollständig zerfallen ist. Sind in einem elektrischen Feld mehrere Leiter eingebettet, so ist der Gleichgewichtszustand dadurch gegeben, daß erstens innerhalb der einzelnen Leiter kein elektrisches Feld besteht, indem jede Spannung in ihnen sich sofort ausgleicht, und zweitens im Raum zwischen den Leitern die Kraftlinien so verlaufen, daß die Spannung längs jeder Verbindungslinie zwischen beliebigen Punkten zweier Leiter die gleiche ist. Ein elektrisches Feld ist als bekannt anzusehen, wenn man für jeden Ort in ihm dessen Spannung gegen einen beliebig festzusetzenden Punkt kennt. Verlegt man diesen Bezugspunkt in einen Leiter, so kann man, da alle Punkte dieses Leiters keine Spannung gegen ihn haben, ihn durch die Gesamtheit des Leiters ersetzen. Ein im Gleichgewicht befindliches elektrisches Feld ist demnach bekannt, wenn für jeden Punkt in ihm dessen Spannung gegen einen willkürlich zu bestimmenden Leiter gegeben ist. Für unsere irdischen elektrischen Messungen pflegt man nun so zu verfahren, daß man den leitenden Erdboden als den willkürlich festgesetzten Leiter wählt und das elektrische Feld durch die Angabe der Spannung jedes Ortes gegen den Erdboden charakterisiert. Diese Größe nennt man das elektrische Potential des Ortes. Es ist also:

Elektrisches Potential = elektrische Spannung gegen den Erdboden.

Ferner folgt ohne weiteres, daß die Spannung zwischen zwei Punkten eines elektrischen Feldes gleich der Differenz ihrer Potentiale ist. Spannung und Potentialdifferenz sind identische Begriffe. Das Potential des Erdbodens ist gleich Null.

Dies Verfahren der Beschreibung eines elektrischen Feldes mit Hilfe eines beliebig festzusetzenden Nulleiters ist das gleiche, wie es zur Angabe von Höhen eingeschlagen wird, die man auf das Meeresniveau bezieht, indem man dessen Höhe willkürlich als Null bezeichnet. Aus dem Vorhergehenden folgt für das Potential auch die weitere Definition:

Das Potential eines Punktes in einem elektrischen Feld ist gleich der Arbeit, die erforderlich ist, um die elektrische Einheitsladung vom Erdboden nach dem Punkte zu schaffen.

Hierbei ist zu beachten, daß dieser gedachte Transport das elektrische Feld nicht in bemerkbarer Weise verändern darf.

Verschiebung einer Ladung in einem Leiter ist wie diejenige eines Flüssigkeitsteilchens in ruhender Flüssigkeit von keiner Arbeitsleistung begleitet, in beiden Fällen vorausgesetzt, daß keine Reibungskräfte vor-

Digitized by Google

handen sind. Druck in ruhender Flüssigkeit und Potential eines Leiters im elektrischen Gleichgewicht sind überall gleich. Die Kraftlinien eines elektrischen Feldes müssen senkrecht auf der Oberfläche von Leitern enden, weil das Feld keine Komponente in der Leiteroberfläche hat. In Flächen, welche überall senkrecht auf den Feldlinien stehen, sind keine elektrischen Spannungen vorhanden, das Potential hat auf ihnen also überall den gleichen Wert. Solche Flächen nennt man Aequipotential- oder Niveauflächen.

8. Einheit der Spannung oder Potentialdifferenz. Im absoluten elektrostatischen Maßsystem ist die Größe der Spannungseinheit durch die Festsetzung der Einheit der Elektrizitätsmenge e und die Beziehung der mechanischen Größen auf cm, g, sec als Einheiten gegeben. Da das Produkt aus elektrischer Ladung e und Potentialdifferenz V eine Arbeitsgröße, also

$$eV = \text{Arbeit}$$

ist, so ist $V = 1$, wenn $e = 1$ und Arbeit $= 1$ ist, d. h.

Zwei Punkte eines elektrischen Feldes haben die Potentialdifferenz 1 e. s. Einheit, wenn die Ueberführung der Elektrizitätsmenge $e = 1$ e. s. Einheit vom einen zum anderen von der Arbeit 1 Erg begleitet ist.

Der dreihundertste Teil dieser e. s. Spannungseinheit ist die technische Einheit der Spannung, oder das Volt. Dieses hat etwa die Größe der Spannung, welche die konstanten Elemente zwischen ihren Polklemmen aufweisen. Daniellelement 1,09 Volt; Clarkelement 1,0434 Volt bei 15° C, Cadmium-Normalelement (Weston) 1,0183 Volt bei 20° C. Das letzte dieser drei Elemente, mit normalem Mercurosulfat beschickt und nach den in London vom Internationalen Comité gegebenen Vorschriften zusammengesetzt, bildet eine außerordentlich genau reproduzierbare Spannungsnormale. Seit dem 1. Januar 1911 wird dieselbe mit dem angegebenen, zu Washington von Vertretern amerikanischer, deutscher, englischer und französischer Staatslaboratorien auf Grund von Messungen mit dem Silbervoltameter festgestellten Spannungswert den Messungen in der physikalisch-technischen Reichsanstalt zu Charlottenburg zugrunde gelegt. Die Arbeit, die bei der Ueberführung der technischen Elektrizitätseinheit, des Coulomb zwischen zwei Stellen von 1 Volt Potentialdifferenz geleistet wird, ist die technische Arbeitseinheit, das Voltcoulomb. In der Sekunde geleistet bildet sie die technische Einheit des Effekts, das Voltampère oder Watt.

9. Spannungsmessung. Die Methoden sind teils statische, teils dynamische. Bei den ersteren bedient man sich der sogenannten Elektrometer, während für die letzteren als sogenannte Voltmeter Strommesser verwendet werden, weil bei ihnen nicht die Spannung direkt gemessen wird, sondern die ihr proportionale Stärke eines mit Hilfe der zu messenden Spannung in einem meist größeren mit dem Instrument verbundenen Widerstand erzeugten Stromes.

Die Elektrometer beruhen sämtlich auf dem Prinzip, daß innerhalb des Instrumentes mit Hilfe der zu messenden Potentialdifferenz ein elektrisches Feld erzeugt wird, in welchem ein geladener leichter Körper eine Antriebskraft erfährt, die ihn in meßbarer Weise verschiebt. Im Thomsonschen Quadrantelektrometer ist es eine zwischen Metallquadranten bewegliche, meist lemniskatenförmig begrenzte Nadel, im Hankelschen und dem ähnlichen Fadenelektrometer ein leichtes Metallblättchen bezw. ein feiner Metallfaden zwischen zwei Metallplatten. Die letzteren und im Quadrantelektrometer die beiden Quadrantenpaare werden mit den Leitern metallisch verbunden, deren Potentialdifferenz gemessen werden soll, Nadel und Blättchen bezw. Faden werden mit Hilfe einer Elektrizitätsquelle geladen. Durch mikroskopische oder Spiegelablesung ist ein hoher Grad von Empfindlichkeit zu erreichen (ca. 10^{-4} Volt). Die Instrumente müssen mit einer bekannten Spannung, etwa einem Normalelement, geaicht werden.

10. Potential eines geladenen Leiters. Kapazität. Führt man einem Leiter an einer Stelle elektrische Ladung zu, so verteilt sich diese derartig, daß im Leiter keine Spannungen vorhanden, daß vielmehr jede Stelle des Leiters die gleiche Spannung gegen einen Punkt der Umgebung oder gegen den Erdboden hat. Das elektrische Feld in der Umgebung des Leiters und mit ihm also die Spannung, das Potential V des Leiters, wächst mit der Ladung e desselben proportional, d. h. es ist

$$e = C.V$$

Wenn die Maßeinheiten für Ladung und Potential festgelegt sind, so hat die Konstante C für einen bestimmten Leiter in bestimmter Lage und Umgebung einen bestimmten numerischen Wert. Es ist $C = \frac{e}{V}$, d. h. gleich der Ladung, welche dem Leiter das Potential Eins erteilt. Je größer C ist, desto größer muß die Elektrizitätsmenge sein, die man dem Leiter zuführen muß, um ihn auf eine gewisse elektrische Spannung gegen die ihn umgebenden Körper zu bringen. Man nennt darum C das Fassungsvermögen des Leiters für Elektrizität oder seine Ka-

Digitized by Google

pazität. Die Einheit der Kapazität ist durch diejenigen von Ladung und Potential bestimmt. Werden e und V in absoluten e. s. Einheiten ausgedrückt, so ist der Quotient dieser Größen die Kapazität des Leiters in absoluten elektrostatischen Einheiten. Mißt man e in Coulomb, V in Volt, so gibt der Quotient die Kapazität in der Einheit des praktischen Maßsystems, der man den Namen Farad gegeben hat. Es ist

$$\text{Farad} = \frac{\text{Coulomb}}{\text{Volt}}.$$

Ein Leiter, dem die Ladung 1 Coulomb die Spannung 1 Volt gegen den Erdboden erteilt, hat die Kapazitätseinheit 1 Farad. Der millionste Teil derselben, 1 Mikrofarad genannt, ist die meist benutzte Einheit für technische Angaben und stellt den immer noch sehr großen Kapazitätswert einer frei im Raum gedachten Kugel von 9 km Radius dar.

11. Potential und Kapazität einer geladenen Kugel in e. s. Einheiten. Eine sehr kleine Kugel von zu vernachlässigenden Dimensionen sei mit der elektrostatisch gemessenen Elektrizitätsmenge e geladen. In der Entfernung r ist die Kraft auf die e. s. Einheitsladung nach dem Coulombschen Gesetz gleich $\frac{e}{r^2}$, also die Arbeit, die für eine Annäherung um die Strecke dr aufzuwenden ist, gleich $\frac{e}{r^2}dr$. Das Potential in der Entfernung R von der Punktladung e erhält man durch Integration dieser Arbeitsgröße von $r = \infty$ bis $r = R$. Es wird

$$V = \frac{e}{R}.$$

Die Feldlinien einer größeren geladenen Kugel verlaufen senkrecht zu ihrer Oberfläche in radialer Richtung. Im Außenraum ist das Feld also derartig, als ob die gesamte Ladung im Mittelpunkt der Kugel vereinigt wäre. Das Potential hat dementsprechend obigen Wert und auf der Oberfläche der Kugel vom Radius ϱ selbst den Betrag

$$V = \frac{e}{\varrho}.$$

Die Kapazität einer Kugel ergibt sich als Quotient aus Ladung und Potential darnach im absoluten elektrostatischen Maß zu

$$C = \varrho,$$

d. h. sie ist gleich ihrem in cm gemessenen Radius.

12. Ungleichmäßige Verteilung. Spitzenwirkung. Ladet man eine Reihe von Kugeln mit verschiedenem Radius, die durch feine Drähte miteinander leitend verbunden sein mögen, so haben alle das gleiche Potential. Die Ladung auf jeder einzelnen Kugel ist ihrer Kapazität, d. h. ihrem Radius proportional. Da aber die Oberfläche jeder Kugel dem Quadrat ihres Radius proportional ist, so folgt, daß die Ladung der Flächeneinheit oder die Flächendichte elektrischer Ladung mit der Größe der Kugel, dem Radius proportional abnimmt. Da jeder Ladungseinheit eine gewisse Anzahl von ihr ausgehender Kraftlinien entspricht (siehe weiter unten Abschnitt 18), so folgt weiter, daß das elektrische Feld nahe an den kleinen Kugeln größer ist als an denen mit größerem Radius. Die elektrische Ladung des Systems und des elektrischen Feldes in seiner Umgebung ist also nicht mehr gleichmäßig verteilt, wenn das System in seinen einzelnen Teilen verschiedene Krümmung aufweist. An Stellen mit extrem starker Krümmung, an Kanten, Ecken und Spitzen nimmt die Ladungsdichte und damit verbunden die Feldstärke sehr hohe Werte an, die so groß werden können, daß die Isolationsfähigkeit des den Leiter umgebenden Gases zerstört wird und Entladung eintritt.

13. Influenzwirkung des elektrischen Feldes auf Leiter. Ausmessung des elektrischen Feldes durch Tropfelektroden. Eine Folge der Tatsache, daß in Leitern sich kein elektrisches Feld im Gleichgewicht befinden kann, ist die Erscheinung der Influenz. Es werde einer positiv geladenen Kugel, die ein radiales elektrisches Feld um sich erzeugt, ein isolierter Leiter genähert. Unter dem Einfluß des vorher an seiner Stelle befindlichen elektrischen Feldes findet ein Strömen der Elektrizität in ihm statt, bis das elektrische Feld vernichtet und das Potential des gesamten Leiters das gleiche ist. Dieses Potential wird einen gewissen mittleren Betrag der vorher an der Stelle des Leiters vorhandenen Potentialwerte besitzen, es wird an der der geladenen Kugel zugewendeten Seite niedriger, an der abgewendeten Seite höher als das Potential der Umgebung sein, mithin wird der Leiter auf der ersteren Seite negative, auf der letzteren positive Ladung aufweisen. Wird der influenzierte Leiter mit Hilfe eines Drahtes zum Erdboden abgeleitet, so nimmt er das Potential Null an, das überall niedriger als das der Umgebung ist. Die Spannungsverteilung im Felde ist dann also derart, daß nach der ganzen Oberfläche des Leiters hin aus der Umgebung her Kraftlinien verlaufen. Der Leiter erscheint dann also in seiner gesamten Ausdehnung negativ geladen, mit der größten Dichtigkeit der Ladung dort, wo das äußere Feld die größte Spannung hat.

Von Interesse ist das Verhalten der sogenannten Tropfelektroden im elektrischen Felde, weil sie es gestatten, in Verbindung mit einem Elektrometer direkt das Potential von Stellen im Felde zu bestimmen, also ein bequemes und darum viel angewandtes

Digitized by Google

Mittel zur Ausmessung eines elektrischen Feldes bieten. Ihre Wirkungsweise ist im Anschluß an die letzte Betrachtung leicht verständlich. Verbindet man mit der einen Elektrode (Platte am Hankelschen, Quadrantpaar am Thomsonschen) eines Elektrometers, dessen andere Elektrode geerdet ist, einen dünnen Draht, dessen freies Ende an die Stelle eines elektrischen Feldes gebracht wird, deren Potential bestimmt werden soll, so wird das Leitersystem Draht-Elektrometer, welches vor der Einführung des Drahtes in das Feld auf dem Potential Null gewesen sein möge, influenziert werden und einen Potentialwert annehmen, der zwischen Null und dem zu messenden Potentialwert liegt, und der um so näher an Null bleibt, je weiter der Draht aus dem Feld herausreicht, und je größer seine und des Elektrometers Kapazität ist. Zwischen dem freien Ende des Drahtes und seiner Umgebung besteht also eine elektrische Spannung, und das Drahtende ist daher mit Influenzelektrizität geladen, negativ, wenn das Potential an der Stelle des Feldes größer ist. Läßt man jetzt von der Drahtspitze dauernd leitende Tropfen (Quecksilber, Wasser) abfallen, so nehmen diese negative Ladung mit sich fort, so lange bis an der Drahtspitze keine Ladung mehr sich befindet, d. h. bis die Drahtspitze und damit also der ganze Draht und die mit ihm verbundene Elektrode des Elektrometers das Potential der Stelle des Feldes, an welcher die Tropfen sich ablösen, angenommen haben. Die fallenden Tropfen können auch durch Anbringen einer kleinen Portion radioaktiver Substanz oder einer kleinen Flamme an der Spitze des Drahtes ersetzt werden. Dies geschieht vorzugsweise bei luftelektrischen Untersuchungen. Beide Mittel erzeugen in der unmittelbaren Umgebung der Spitze Leitfähigkeit des Gases, wodurch eine zwischen der Spitze und der Umgebung bestehende Potentialdifferenz auch ausgeglichen wird wie durch die fallenden Tropfen.

14. Der elektrische Kondensator. Mit der durch die Einführung von Leitern bewirkten Veränderung eines elektrischen Feldes ist im allgemeinen auch eine Aenderung der Ladungsverteilung auf dem felderregenden Leiter verbunden. Es mögen (Fig. 1) einer geladenen Kugel zwei erdabgeleitete Metallkörper beliebiger Form genähert werden. Nach dem am nächsten gelegenen Leiter A ist dann von der Kugel aus das Potentialgefälle am größten, nach dem Leiter B hin weniger groß, noch kleiner an der den Leitern abgewendeten Seite der Kugel. Dasselbe gilt von der Feldstärke und der Dichtigkeit der Kraftlinien. Diese verlaufen am dichtesten von der Kugel nach A, weniger dicht nach B, noch weniger in die weitere Umgebung. Der Raum von der Kugel aus hinter den Leitern A und B ist je nach deren Ausdehnung mehr oder weniger feldgeschützt. Aus dem ungleichförmigen Verlauf der Kraftlinien folgt direkt, daß die Ladung der Kugel auf ihrer Oberfläche ungleichmäßig verteilt ist; denn jedem freien Ende von Kraftlinien entspricht ja eine gewisse Ladung. Je mehr man A der Kugel nähert, desto mehr wird das Feld auf den Zwischenraum zwischen Kugel und Konduktor A beschränkt, desto

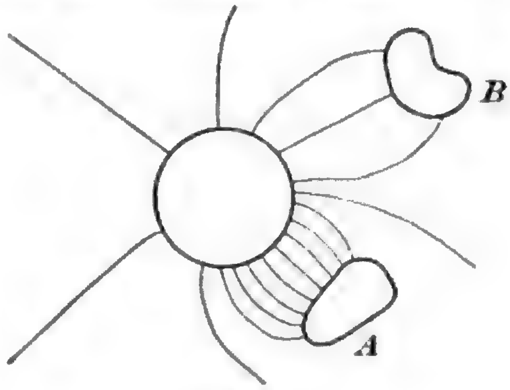


Fig. 1.

mehr zieht sich die Ladung auf den dem Leiter A gegenüberbefindlichen Oberflächenteil der Kugel zusammen. So kommt es, daß die Ladung einer Metallplatte, die zunächst, wenn die Platte allein mitten in einem größeren Raum, von dessen Wänden unbeeinflußt, dasteht, gleichmäßig auf beiden Seiten ausgebreitet ist, sich immer mehr auf einer Seite zusammenzieht, wenn der Platte von dieser Seite her eine zweite geerdete genähert wird. Ist der Abstand dieser Erdplatte von der geladenen Platte klein im Verhältnis zu den Abständen der anderen umgebenden Körper von derselben, so besteht das elektrische Feld fast nur im Zwischenraum zwischen den beiden Platten. Sind die Platten von genügender Größe, so verlaufen die Feldlinien als äquidistante gerade Linien, das Feld ist ein homogenes. Die Ladung und mithin die Feldstärke im Zwischenraum der Platten werden durch die Annäherung der geerdeten Platte gar nicht mehr verändert, sobald das Feld sich nur noch merklich zwischen den Platten befindet, die Umgebung also einflußlos geworden ist. Das Potential der geladenen Platte muß dann also proportional mit dem Plattenabstand kleiner werden. Daraus ergibt sich, daß man der Platte eine um so größere Ladung zuführen muß, um sie auf einen bestimmten Spannungswert zu bringen, je kleiner der Abstand zur Erdplatte wird. Die Kapazität ist diesem Abstand umgekehrt proportional und erreicht für kleine Werte desselben hohe Beträge. Die beschriebene Vorrichtung heißt ein Kondensator. An Stelle des beschriebenen Plattenkondensators finden technisch

Digitized by Google

auch Zylinderkondensatoren, besonders in der Form der sogenannten Leydener Flaschen Verwendung. Die von der isolierten Kollektorplatte des Kondensators ausgehenden Kraftlinien enden frei an den gegenüberliegenden Stellen der geerdeten Kondensatorplatte. Die letztere ist also durch Influenz mit der entgegengesetzt gleichen Ladung versehen. Das elektrische Feld des Plattenkondensators ist homogen, seine Intensität gleich der Spannung pro Längeneinheit, also gleich der Potentialdifferenz dividiert durch den Abstand der Platten. Während es bei gleich erhaltener Ladung unabhängig vom Plattenabstand ist, wächst es dem letzteren umgekehrt proportional an, wenn durch leitende Verbindung der Platten mit einer Spannungsquelle (Element) für Konstanthaltung der Potentialdifferenz und die dazu nötige Lieferung von Elektrizität gesorgt wird.

C. Energie des elektrischen Feldes.

15. Bewegung einer Ladung in einem elektrischen Felde. Führt ein mit der Ladung e versehenes Teilchen eine Bewegung im elektrischen Felde zwischen zwei Punkten aus, die eine Spannung V gegeneinander haben, so wird dabei die Arbeit eV geleistet. Der dazu nötige Energiebetrag wird dem elektrischen Felde entzogen und tritt in einer anderen Form wieder auf, entweder als Bewegungsenergie des Teilchens, das eine Geschwindigkeit erlangt hat, oder, falls diese durch Reibungskräfte vernichtet wird, als Wärme, oder es kann endlich das Teilchen etwa durch Koppelung mit einer Maschine zu irgendwelcher mechanischen Arbeitsleistung veranlaßt werden. Alles würde in gleicher Weise auf Kosten von elektrischer Feldenergie geschehen. Die Bewegung eines Coulombs längs einer Spannung von 1 Volt entzieht dem elektrischen Feld die technische Energieeinheit 1 Joule. Dies geschieht z. B. in der Sekunde, wenn in einem Draht, der die Pole eines Elements von 1 Volt Spannung verbindet, der Strom ein Ampère fließt. Es wird dem Feld diese kundliche Energiemenge

$$1 \text{ Volt-Ampère} = \frac{1 \text{ Volt-Coulomb}}{\text{Sekunde}} = \frac{1 \text{ Joule}}{\text{Sekunde}} = 1 \text{ Watt}$$

entzogen. Chemische Vorgänge im Element sorgen für Aufrechterhaltung des elektrischen Feldes, welches ohne diese ungeheuer schnell zerfallen würde.

16. Energie des elektrischen Feldes um einen geladenen Leiter. Ein beliebiger Leiter, z. B. die Kollektorplatte eines Kondensators, sei mit der Ladung e auf das Potential V_0 geladen. Ist C die Kapazität, so ist

$$e = CV_0.$$

Entladet man die Platte nach und nach durch stufenweises Entziehen kleiner Ladungsbeträge de, wobei jedesmal das Potential von seinem augenblicklichen Wert V um den kleinen Betrag dV so sinkt, daß

$$de = CdV,$$

so wird stufenweise dem elektrischen Felde der Energiebetrag

$$dE = Vde = CVdV$$

entzogen, bis das Potential auf Null gesunken, d. h. die Platte ganz entladen, das Feld ganz verschwunden ist. Die Summation ergibt als die gesamte bei der völligen Entladung verschwundene Energie des elektrischen Feldes den Betrag

$$E = \int_0^{V_0} CVdV = \frac{1}{2} CV_0^2 = \frac{1}{2} eV_0.$$

17. Verteilung der Energie im elektrischen Felde. Energiedichte. Der eben abgeleitete Betrag stellt die Gesamtenergie des elektrischen Feldes dar. Sie hat bei dem Kondensator ihren Sitz im Zwischenraum der Platten und besitzt wie jede andere Energieform, wie z. B. Wärme, Strömungs-, Spannungsenergie, eine Verteilung im elektrischen Felde, die beim Kondensator wie das Feld selbst gleichförmig sein wird. Man erhält darum die Feldenergie der Volumeneinheit oder die Energiedichte des Kondensatorfeldes, wenn man die gesamte Energie E durch das Volumen des Feldes dividiert. Ist S die Plattengröße, d der Plattenabstand des Kondensators, $\mathfrak{E}$ die Feldstärke so ist daher

$$\text{Energiedichte} = \frac{1}{2}\frac{e}{S}\frac{V_0}{d} = \frac{1}{2}\frac{e}{S}\mathfrak{E} = \frac{1}{2}\sigma\mathfrak{E}.$$

Da weiterhin die Flächendichte σ der Ladung ihrerseits der Feldstärke $\mathfrak{E}$ proportional ist, so ist hieraus ersichtlich, daß

die Energiedichte des elektrischen Feldes dem Quadrate der Feldstärke proportional

ist. In ungleichförmigen Feldern ist auch die Energie ungleichförmig nach diesem Satze verteilt. An den Stellen größerer Feldstärke ist auch der Sitz der größeren Energiebeträge.

II. Das elektrische Feld in der Materie.

18. Die elektrische Erregung des Aethers. Es sei eine mit + e geladene kleine Kugel gegeben. Zur Begrenzung des radialen elektrischen Feldes nach außen sei sie mit einer konzentrischen erdabgeleiteten Kugel von beliebigem größeren Radius umhüllt. Ladung und Stärke des elektrischen Feldes werden an Größe durch dieselbe nicht beeinflußt. Die Wirkung der äußeren Kugel ist nur die, daß die Gesamtspannung des elek-

Digitized by Google

trischen Feldes, die Potentialdifferenz zwischen den beiden Kugeln herabgesetzt wird, um so mehr, je näher die beiden Kugelflächen einander sind. Intensität des elektrischen Feldes und Ladung sind einander proportional, in ihrer numerischen Beziehung im elektrostatischen Maßsystem durch das ihm zugrunde gelegte Coulombsche Gesetz gegeben. Zeichnet man die Kraftlinien des elektrischen Feldes so, daß sie eine zum Feld senkrechte Flächeneinheit in einer Anzahl durchsetzen, die numerisch der elektrostatisch gemessenen Feldintensität gleich ist, so wird jede konzentrische Kugelfläche vom Radius r von einer gesamten Linienzahl

$$N = \mathfrak{E} . 4\pi r^2$$

durchsetzt, oder da an jeder Stelle einer solchen Kugelfläche nach dem Coulombschen Gesetz die Kraft auf die Ladungseinheit, d. i. die Feldstärke den Wert

$$\mathfrak{E} = \frac{e}{r^2}$$

hat, so ist

$$N = 4\pi r^2 . \frac{e}{r^2} = 4\pi e.$$

Die gesamte von einer Ladung e ausgehende Kraftlinienzahl N oder, wie man auch sagt, der gesamte von der Quelle der Ladung e ausgehende Kraftfluß ist mit der Ladung durch die Beziehung:

$$\text{Kraftfluß} = 4\pi . \text{Ladung}$$

verbunden. Beide Größen sind einander proportional. Die Größe des Proportionalitätsfaktors hängt vom gewählten Maßsystem ab und ist gleich 4π, wenn das elektrostatische Maßsystem zugrunde gelegt wird.

Ein Flächenelement dS wird nach der Kraftliniendefinition von $\mathfrak{E}_\nu dS$-Linien durchsetzt, wo $\mathfrak{E}_\nu$ die zu dS senkrechte Komponente der Feldstärke ist. Der totale Kraftfluß einer Ladung ist also gegeben durch das Oberflächenintegral $\int \mathfrak{E}_\nu dS$, welches über eine die Ladung umhüllende geschlossene Fläche zu erstrecken ist. Er ist gleich 4π mal der elektrostatisch gemessenen Ladung (Gaussscher Satz).

Wie aus den eben gemachten Ausführungen ersichtlich, ist die elektrische Ladung ein Maß für die gesamte von ihr herrührende elektrische Veränderung des Raums oder Aethers, man kann sie darum auch direkt als Gesamterregung des Aethers bezeichnen. So ist die Gesamtladung, die sich auf der Kollektorplatte eines Kondensators befindet, ein direktes Maß der Gesamterregung im ganzen Kondensatorraum. Die Flächendichte σ der Ladung d. i. die auf dem Quadratzentimeter befindliche Elektrizitätsmenge kann man als die auf die Flächeneinheit berechnete oder spezifische Erregung des Aethers bezeichnen. Es hat den Anschein als ob die Ladungen $+\sigma$ und $-\sigma$ im Aether durch die Flächeneinheit in entgegengesetzter Richtung verschoben würden und an den beiden Enden des Kraftlinienbündels auf den Metallplatten zur freien Wirkung kämen. In der Faraday-Maxwellschen Theorie wird darum die spezifische Erregung auch elektrische Verschiebung (electric displacement) genannt. Die spezifische Erregung oder elektrische Verschiebung an einer Stelle des Feldes ist gleich der Ladung, welche an den freien Enden der an der Stelle durch die Flächeneinheit gehenden Kraftlinien auftritt. Dieser Kraftfluß durchs qcm ist im Aether numerisch gleich der Feldstärke $\mathfrak{E}$ und mit der zugehörigen Ladungsdichte σ im elektrostatischen Maß nach dem vorher gegebenen Satze verbunden durch die Beziehung:

$$\mathfrak{E} = 4\pi\sigma.$$

19. Die Polarisation des materiellen Dielektrikums im elektrischen Felde. Auf den Platten eines Vakuumkondensators trifft nach vorigem als Aeußerung der elektrischen Verschiebung $\mathfrak{D}$ eine als Maß derselben dienende Ladung σ der Flächeneinheit auf, die mit der Feldstärke in der Beziehung steht:

$$\sigma = \frac{1}{4\pi} . \mathfrak{E}.$$

Jetzt möge der Zwischenraum zwischen den Platten mit einem materiellen Medium ausgefüllt und dabei Sorge getragen werden, daß die Spannung und damit die Feldstärke nicht geändert wird. Dies kann z. B. dadurch geschehen, daß die Platten mit den Polen einer Spannung liefernden galvanischen Kette verbunden werden. Die neueren Forschungen haben zu der Erkenntnis geführt, daß die Atome und Moleküle der Materie aus geladenen Teilchen aufgebaut sind, den negativen Elektronen und positiv geladenen Kernen. Im neutralen Atom nehmen diese geladenen Bestandteile eine bestimmte Gleichgewichtslage ein, um welche sie schwingende Wärmebewegung ausführen, und aus welcher sie durch äußere elektrische Kräfte gegen eine je nach der atomaren Struktur mehr oder weniger große quasielastische Gegenkraft verschoben werden können. Eine solche Verschiebung der materiellen Ladungen wird im elektrischen Felde des Kondensators eintreten. Ist sie in cm gemessen gleich x, und befinden sich im ccm $\mathfrak{N}$ Teilchen, deren jedes die Ladung e trägt, so wird durch die Flächeneinheit im Dielektrikum die Ladung $\mathfrak{N}ex$ verschoben, und es muß sich diese durch die Polarisation der materiellen Atome hervorgerufene Verschiebung zu der im Aether erregten σ addieren. Es muß also auf den Platten des Kondensators jetzt eine größere Ladungsdichte σ' als Maß für die Gesamtverschiebung $\mathfrak{D}$

Digitized by Google

(Faraday-Maxwellsches „displacement") auftreten, als bei Abwesenheit der Materie. Und zwar ist

$$\mathfrak{D} = \sigma' = \sigma + \mathfrak{N}ex.$$

Auf jedes Teilchen wirkt verschiebend die Kraft $e\mathfrak{E}$, rücktreibend die Kraft Dx, wenn mit D die in 1 cm Entfernung aus der Ruhelage wirkende Direktionskraft des Teilchens bezeichnet wird. Gleichgewicht im elektrischen Felde ist, wenn

$$e\mathfrak{E} = Dx \text{ oder } x = \frac{e}{D} . \mathfrak{E}.$$

Setzt man diesen Wert oben ein, so wird

$$\sigma' = \frac{1}{4\pi}\mathfrak{E} + \frac{\mathfrak{N}e^2}{D}\mathfrak{E} = \frac{\mathfrak{E}}{4\pi}\left(1 + \frac{4\pi\mathfrak{N}e^2}{D}\right) = \frac{\varepsilon}{4\pi}\mathfrak{E}.$$

Es zeigt sich, daß die Erregung von Aether und Materie zusammen, d. i. die Ladung des materieerfüllten Kondensators, den ε-fachen Betrag der Aethererregung allein hat. ε heißt die Dielektrizitätskonstante der Materie; sie hat den Wert des Klammerfaktors in letzter Gleichung:

$$\varepsilon = 1 + \frac{4\pi\mathfrak{N}e^2}{D},$$

setzt sich also zusammen aus der Dielektrizitätskonstante 1 des Aethers und dem zweiten Summanden, den man als Dielektrizitätskonstante der Teilchengattung bezeichnen kann. Sind außer diesen Teilchen noch andere Gattungen solcher in der Materie anzunehmen, mit anderen Konstanten $\mathfrak{N}$, e, D, so treten als weitere Summanden die Dielektrizitätskonstanten dieser Gattungen hinzu, und es wird

$$\varepsilon = 1 + \Sigma \frac{4\pi\mathfrak{N}e^2}{D},$$

worin die Summe über alle Teilchengattungen zu bilden ist.

Diese von Drude gegebene Theorie des Dielektrikums, die von ihm unter Berücksichtigung des Umstandes, daß die unter einer Direktionskraft D stehenden Teilchen schwingungsfähige Gebilde darstellen, zu einer Dispersionstheorie erweitert wurde, kann nur auf angenäherte Gültigkeit Anspruch machen. Strenger ist sie von H. A. Lorentz sowie M. Planck durchgeführt worden.

Wie der abgeleitete Ausdruck für die Dielektrizitätskonstante zeigt, ist dieselbe außer von der Konzentration und Ladung der materiellen Teilchen von der Direktionskraft abhängig, welche diese Teilchen an ihre Gleichgewichtslage im Atom hält, und zwar in der Weise, daß ε um so größer ist, je geringer diese Kraft ist. Damit hängt höchstwahrscheinlich die Tatsache zusammen, daß alle Substanzen hoher Dielektrizitätskonstante ein gewisses Leitvermögen besitzen, während umgekehrt im allgemeinen eine Substanz eine um so größere Isolationsfähigkeit verbürgt, je kleiner der Wert von ε für sie ist. Eine geringe atombindende Kraft D wird zur Folge haben können, daß die geladenen Teilchen bei ihrer molekularen Bewegung sich aus dem Atom vorübergehend loslösen und als frei bewegliche Ladungsträger einen Transport von Elektrizität im elektrischen Felde vermitteln können.

20. Ladung und Feld im materieerfüllten Kondensator. Erweiterung des Coulombschen Gesetzes. Wird, wie im vorigen Paragraphen, die Spannung zwischen den Kondensatorplatten, also die Feldstärke konstant erhalten, so wird nach vorigem bei Einführung des materiellen Mediums in den Kondensator die gesamte elektrische Verschiebung und damit die Ladung des Kondensators auf den ε-fachen Betrag der Größe im Vakuum gesteigert. Die Kapazität des Kondensators ist also ε-mal größer geworden. Dies wurde experimentell zuerst von Cavendish und etwa 60 Jahre später von Faraday festgestellt.

Ist der Kondensator bei der Einführung des Dielektrikums nicht leitend mit einer für Konstanz der Spannung sorgenden Elektrizitätsquelle verbunden, sondern mit isolierter Kollektorplatte aufgestellt, so daß die Ladung gleich bleibt, so sinken Spannung und Feldstärke auf den ε-ten Teil ihres Wertes im leeren Raum herab. Die Stärke des elektrischen Feldes um eine gegebene Ladung sinkt in einem Medium der Dielektrizitätskonstante ε auf den ε-ten Teil ihres Betrages im Aether. Eine Ladung erfährt darum im Felde eines geladenen Körpers eine ε mal kleinere Antriebskraft, wenn der Raum mit einem Dielektrikum erfüllt ist. Das Coulombsche Gesetz (siehe den Artikel „Elektrizität") in seiner Erweiterung vom leeren Raum auf das Dielektrikum lautet also:

$$\text{Kraft} = \frac{1}{\varepsilon} \cdot \frac{ee'}{r^2}.$$

21. Verhalten der Grenzfläche von Materie gegen Vakuum. Es werde eine Isolatorplatte in einen Kondensator gebracht, dessen Platten auf einer bestimmten Spannung gegeneinander gehalten werden. Und zwar betrachten wir zwei Grenzfälle. Im einen soll die Platte die ganze Dicke des Feldes, aber nur einen Bruchteil seiner Flächenausdehnung einnehmen, d. h. also eine Isolatorscheibe von einer Dicke gleich dem Plattenabstande des Kondensators seitlich in diesen eingeführt werden, im zweiten soll eine dünnere Isolatorscheibe parallel den Kondensatorplatten den ganzen Kondensator quer durchsetzen. Im ersten Fall ist die Grenzschicht Materie Vakuum parallel, im zweiten senkrecht zu den Feldlinien. Die Verteilung von Feld und Ladung läßt

Digitized by Google

sich nach dem Vorausgehenden direkt angeben. Im ersten Fall, veranschaulicht durch Figur 2, muß die Feldstärke, die durch die

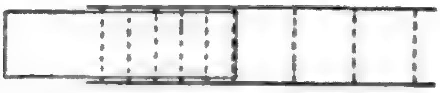


Fig. 2.

Spannung pro cm gegeben ist, im Isolator und Vakuum die gleiche sein. Die Erregung und die ihr gleiche Flächendichte der Ladung muß aber in dem vom Isolator erfüllten Teile des Kondensators ε-mal größer als im übrigen Teile sein. Es wird also durch das seitliche Einführen der Isolatorplatte eine Verteilungsänderung in dem Sinne eintreten, daß die Ladung nach dem materieerfüllten Teil fließt. Der Kondensator verhält sich wie zwei parallel geschaltete, von denen der eine ein materielles Dielektrikum enthält und damit eine vergrößerte Kapazität besitzt. Da Ladungs- und Kraftlinienzahl einander proportional sind, so muß im Kraftlinienbilde die Dichtigkeit der Linien im Isolator ε-mal größer als im Vakuum sein.

Anders im Fall 2, der in Figur 3 dargestellt ist. Hier sind schon aus Symmetriegründen Ladung und Feldliniendichte wie Erregung überall die gleichen. Daraus folgt aber, daß die Feldstärke im Inneren der Isolatorplatte ε-mal kleiner ist wie im

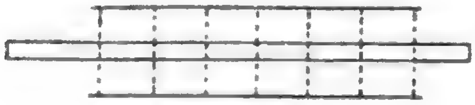


Fig. 3.

übrigen Raum des Feldes. Durch die Verschiebung der Ladungen in den kleinsten Teilchen des Isolators wird das Feld in ihm zum Teil entspannt, so daß die Spannung und damit die Feldstärke, d. i. die auf die Längeneinheit gemessene Spannung, kleiner wird. Wenn die Gesamtspannung des Kondensators konstant erhalten wird, fällt bei Einführung der Platte der auf den Isolator entfallende Bruchteil, wofür dann Spannung und Feldstärke im leeren Raum des Kondensators steigen. Letzteres ist nicht der Fall, wenn nicht die Gesamtspannung, sondern die Ladung des Kondensators gleichbleibend erhalten wird. Dann bleibt bei Einführung der Isolatorplatte das Feld im leeren Teil dasselbe, sinkt im Isolator auf den ε-ten Teil, womit dann ein Sinken der Gesamtspannung verbunden ist. Füllt die Platte das Feld ganz aus, so sinkt auch die Gesamtspannung auf $\frac{1}{\varepsilon}$ ihres Wertes im Vakuum herab.

Das Resultat dieser Betrachtung ist: Wird in ein elektrisches Feld im Vakuum eine Isolatorplatte so eingeführt, daß sie senkrecht zu den Feldlinien steht, so ist in ihr die Feldstärke ε-mal kleiner als im Vakuum. Bei dem Durchgang durch eine Grenzfläche von Materie und Vakuum, die parallel zu den Feldlinien ist, ändert sich dagegen die Feldstärke nicht.

Zur Beantwortung der Frage nach dem Verhalten des elektrischen Feldes bei dem Uebergang durch eine schief zur Feldrichtung stehende Grenzfläche verfährt man so, daß man die Feldstärke in zwei Komponenten parallel und senkrecht zur Grenzfläche zerlegt. Die erstere, die sogenannte Tangentialkomponente der Feldstärke, ist im Isolator die gleiche, die andere die Normalkomponente, nimmt beim Durchgang in den Isolator sprungweise auf $\frac{1}{\varepsilon}$ ihres Betrages im Vakuum ab. Im Isolator setzen sich beide Komponenten zu einem Feldwert zusammen, der andere Größe und andere Richtung wie im Vakuum hat. Es findet an der Grenzschicht also eine Brechung der Kraftlinien statt, und zwar, weil die im Einfallslot liegende Komponente im Isolator kleiner ist als außen, in der Weise daß die Feldrichtung im Isolator mehr vom Einfallslot fortweist als außen.

Eine Folge der Kraftlinienbrechung ist, daß ein hohlkugel- oder ringförmiges Gebilde eines Isolators hoher Dielektrizitätskonstante, in ein elektrisches Feld gebracht, dem Innenraum Kraftlinien entzieht, weil diese durch Brechung gewissermaßen in den Isolator hineingezogen und in ihm konzentriert werden. Dieser Feldschutz spielt im elektrischen Felde allerdings nur eine untergeordnete Rolle, ist aber in einer analogen Erscheinung im Magnetfeld von hoher praktischer Bedeutung.

22. Energie des elektrischen Feldes im Dielektrikum. Influenzierung und Bewegung eines Isolators im elektrischen Felde. Im Abschnitt 17 war gezeigt, daß die Energiedichte des elektrischen Feldes im Aether durch das halbe Produkt aus Feldstärke $\mathfrak{E}$ und Ladungsdichte σ gegeben ist, für welch letztere man nach dem Vorigen die elektrische Verschiebung im Aether $\mathfrak{D}$ setzen kann. In der Materie kommt zu dem Teil der Feldenergie, welcher von der Verschiebung im Aether herrührt, noch der der Ladungsverschiebung in den Atomen zukommende Teil hinzu, so daß die Gesamtenergie des Feldes in der Volumeneinheit gleich ist

$$E = \frac{1}{2}\,\mathfrak{E}\sigma',$$

Digitized by Google

worin $\sigma' = \varepsilon\sigma$ nach Abschnitt 19 die durch die Verschiebung im Aether und in der Materie zusammen erzeugte Ladungsdichte ist. Es ist demnach die Energiedichte in dem Dielektrikum

$$E = \frac{\varepsilon}{2}\,\mathfrak{E}\sigma = \frac{\varepsilon}{8\pi}\,\mathfrak{E}^2.$$

Ein Feld $\mathfrak{E}$ repräsentiert also in einem materiellen Medium einen im Verhältnis seiner Dielektrizitätskonstante größeren Energiebetrag als im Aether.

Wird in einen geladenen Kondensator eine dielektrische Platte eingeführt, so sinkt die Feldstärke, und zwar auf den ε-ten Teil, wenn die Platte das ganze Kondensatorfeld ausfüllt. Dementsprechend sinkt auch die Energie des Feldes auf den ε-ten Teil. Diese Energieabnahme hat ihre innere Ursache in der teilweisen Entspannung des elektrischen Feldes durch die Materie und findet ihr Aequivalent in einer mechanischen Arbeitsleistung bei der Bewegung der Platte, welche also mit einer gewissen Kraft in das elektrische Feld hineingezogen wird. Es ist diese Kraft um so größer, je stärker das Feld gespannt ist, und je mehr es durch die dielektrische Platte entspannt wird, d. h. je größer die Dielektrizitätskonstante derselben ist. Dies gilt allgemein für die Bewegungstendenz eines Isolators in einem inhomogenen elektrischen Feld. Diese ist stets derartig, daß ein Medium von höherer Dielektrizitätskonstante nach Stellen größter Feldstärke zu gelangen strebt. Dann wird nämlich das bestehende elektrische Feld am meisten entspannt und seine Energie ein Minimum. Im homogenen elektrischen Feld erfährt eine Kugel aus isolierendem Material keinen Bewegungsantrieb. Hängt man zwischen die Platten eines Kondensators an einen Coconfaden eine Bernstein- oder Siegellackkugel, die man durch Bestreichen mit einer Flamme von etwa vorhandener Ladung befreit hat, so verändert sie ihre Lage gar nicht, wenn der Kondensator geladen wird. In der näheren Umgebung der Kugel ist die Homogenität des elektrischen Feldes gestört, indem seine Kraftlinien sich derart anordnen, daß die Feldenergie ein Minimum wird. Die Feldlinien werden von der elektrischen Kugel gleichsam aufgesogen und der Umgebung entzogen, bis Spannungsgleichgewicht hergestellt ist. Der Feldlinienverlauf hat dann ein ähnliches Aussehen, als wenn die Kugel ein Leitvermögen besäße, insbesondere dann, wenn ihre Dielektrizitätskonstante groß ist. Dies hat seinen Grund darin, daß beide, Isolator und Leiter das Feld in ihrem Inneren entspannen. Der Isolator um so mehr, je höheren Wert seine Dielektrizitätskonstante hat, der Leiter vollständig. Ein Leiter wirkt also ähnlich wie ein Isolator von unendlich hoher Dielektrizitätskonstante, und es ist deshalb an Stelle dieses letzteren Namens auch des öfteren der Name „dielektrisches Leitvermögen" angewendet worden. Es ist aber ein prinzipieller Unterschied zwischen Leiter und Isolator zu betonen. Während im ersteren ein freies Fließen der Elektronen und damit eine wirkliche Ladung der Leiterteile stattfindet, geschieht die Trennung der Elektrizitäten im Isolator nur auf atomare Entfernungen, so daß jedes auch noch so kleine Stück desselben zwar polarisiert, insgesamt aber ungeladen erscheint.

Die Isolatorkugel hat nach dem eben Gesagten also die Wirkung, an der Ein- und Austrittseite der Kraftlinien, d. h. in den polaren Gebieten, das elektrische Feld der Umgebung zu verstärken, dagegen in seitlicher Umgebung, in den äquatorialen Teilen das Feld zu schwächen. Eine zweite dielektrische Kugel seitlich der ersteren genähert wird darum abgestoßen, dagegen von den polaren Gebieten angezogen, weil sie nach Stellen größter Feldstärke zu gelangen trachtet.

23. Dielektrischer Widerstand. Dem Satze, daß jede von selbst eintretende Veränderung an einem von gegebenen Ladungen herrührenden elektrischen Feld, sei es eine Verteilungsänderung der Feldlinien oder eine Bewegung eines Leiters oder Isolators, so gerichtet ist, daß die Energie des elektrischen Feldes kleiner wird, und daß im Falle des Gleichgewichts die Energie einen Minimalwert hat, kann man noch eine besondere Fassung geben. Greift man aus dem elektrischen Felde einen röhrenförmigen Raum heraus, dessen Wand von Kraftlinien gebildet wird, und dessen Grundflächen senkrecht zur Feldrichtung stehen, so ist der Energiegehalt einer solchen sogenannten Kraftröhre leicht zu berechnen. Ein kurzes Stück von der Länge dl, dessen Querschnitt q als konstant angesehen werden kann, in dem also die Feldstärke überall den gleichen Wert $\mathfrak{E}$ hat, hat den Energiegehalt

$$E\,.\,q\,dl = \frac{\varepsilon}{8\pi}\,\mathfrak{E}^2 q\,dl = \frac{1}{8\pi}\,\varepsilon^2\mathfrak{E}^2 q^2\,.\,\frac{dl}{\varepsilon q} = \frac{1}{8\pi}\,N^2\,.\,\frac{dl}{\varepsilon q}.$$

$N = \varepsilon\mathfrak{E}q$ ist die den Querschnitt q durchsetzende Kraftlinienzahl, der Kraftfluß durch die Röhre, der durch die ganze Röhre hindurch den gleichen Wert hat. Den Energiegehalt A der betrachteten Röhre erhält man durch Integration dieses Ausdrucks über die ganze Länge der Kraftröhre.

$$A = \frac{1}{8\pi}\,N^2\int\frac{dl}{\varepsilon q} = \frac{1}{8\pi}\,N^2 W.$$

Ein solcher Ausdruck stellt auch die Energie des ganzen elektrischen Feldes dar,

das ja in einzelne Kraftröhren zerlegt gedacht werden kann. Die Größe

$$W = \int \frac{dl}{\varepsilon q}$$

nennt man in ersichtlicher Analogie zum galvanischen Widerstand eines Drahtes den **dielektrischen Widerstand** der Kraftröhre. Er ist im homogenen Medium (ε konstant) und homogenen Feld (q konstant) der Länge der Röhre direkt, dem Querschnitt derselben und der Dielektrizitätskonstanten umgekehrt proportional. Die Dielektrizitätskonstante spielt für das elektrische Feld im Isolator also die Rolle, welche die galvanische Leitfähigkeit für den Strom in einem Leiter übernimmt, woraus der bereits oben erwähnte Name dielektrische Leitfähigkeit für ε noch besser verständlich wird. Die Analogie der Größe N mit der Stromstärke, die sich auch in der formalen Uebereinstimmung der obigen Energieformel mit dem Jouleschen Ausdruck für die Stromwärme kundgibt, rechtfertigt auch den für N gewählten Namen Kraftfluß. Da der Gesamtkraftfluß eines elektrischen Feldes eine durch die vorhandenen Ladungen gegebene Größe ist, so kann man den Gleichgewichtssatz auch folgendermaßen formulieren:

Alle Veränderungen und Bewegungen in einem elektrischen Felde gehen so vor sich, daß der dielektrische Widerstand des Feldes sich verkleinert. Im Gleichgewicht hat derselbe einen Minimalwert.

24. Allgemeine Feldbedingungen. Elektrodynamisches Feld. Die Gesamtverschiebung $\mathfrak{D}$ durch die Flächeneinheit in einem Medium der Dielektrizitätskonstante ε ist mit der Feldstärke $\mathfrak{E}$ verbunden durch die Beziehung

$$\mathfrak{D} = \frac{\varepsilon}{4\pi} \mathfrak{E}$$

Das über eine geschlossene Oberfläche gebildete Integral

$$\int \mathfrak{D}_\nu dS = \frac{1}{4\pi} \int \varepsilon \mathfrak{E}_\nu dS$$

stellt die überall in Richtung der Normalen ν der Oberfläche durch dieselbe hindurchgehende Gesamtverschiebung dar, ist also ein Maß für die gesamte Elektrizitätsmenge, die sich in dem von der Fläche umschlossenen Raum befindet. Ist letztere mit einer beliebigen räumlichen Dichte ϱ verteilt, so ist

$$\int \mathfrak{D}_\nu dS = \int \varrho d\tau,$$

wobei das Volumenintegral über den von der Fläche umschlossenen Raum zu bilden ist. Die Umwandlung des Oberflächen- in ein Raumintegral ergibt die Beziehung

$$\int \left(\frac{\partial \mathfrak{D}_x}{\partial x} + \frac{\partial \mathfrak{D}_y}{\partial y} + \frac{\partial \mathfrak{D}_z}{\partial z} \right) d\tau = \int \varrho d\tau,$$

und weil dieselbe für jedes beliebige Volumenelement gilt, den Satz:

$$\frac{\partial \mathfrak{D}_x}{\partial x} + \frac{\partial \mathfrak{D}_y}{\partial y} + \frac{\partial \mathfrak{D}_z}{\partial z} = \operatorname{div} \mathfrak{D} = \varrho.$$

Die Summe der drei Differentialquotienten der Verschiebungskomponenten nach ihren Richtungen stellt den Ueberschuß der aus der Volumeneinheit heraustretenden gegen die hineingerichtete Verschiebung dar und wird Divergenz des Verschiebungsvektors genannt. Sie verschwindet an allen Stellen, wo sich keine elektrischen Ladungen befinden, und bildet an jeder Stelle ein Maß für die Quellenstärke des Verschiebungsvektors, d. h. für die Ladungsdichte an der Stelle. In der Hydrodynamik besteht dieselbe Gleichung für den Geschwindigkeitsvektor einer inkompressiblen Flüssigkeit. Die Divergenz des Geschwindigkeitsvektors verschwindet überall, wo nicht Quellen oder Senken der Flüssigkeit sich befinden. Quellen entspricht positive, negativen Quellen, d. h. Sinkstellen entspricht negative Ladung.

Es war weiter gezeigt, daß ein im Gleichgewicht befindliches elektrisches Feld sich durch eine bestimmte Verteilung einer Potentialfunktion darstellen läßt, und daß deshalb bei der Bewegung einer elektrischen Ladung längs einer geschlossenen Kurve keine Arbeit geleistet wird. Dieser Satz stellte sich dar in der Gleichung

$$\int \mathfrak{E}_s ds = 0,$$

in der das Integral über eine geschlossene Kurve zu erstrecken ist und die Arbeit bei der Rotation einer Einheitsladung längs der geschlossenen Bahn darstellt. In der Hydrodynamik besteht dieselbe Gleichung, wenn wir an Stelle des Vektors $\mathfrak{E}$ den Vektor Geschwindigkeit setzen, in einer bewegten Flüssigkeit, in der keine Wirbelbewegung stattfindet. Man sagt darum: das statische elektrische Feld hat eine irrotationelle oder wirbelfreie Verteilung.

Nun gibt es aber auch elektrische Felder, in denen das obige Integral nicht verschwindet, das sind demnach Felder, die keine wirbelfreie Verteilung der Feldstärke zeigen, mithin keine eindeutige Potentialfunktion besitzen. Solche elektrischen Felder können zwar einen stationären Charakter annehmen, sind aber keine Gleichgewichtsfelder; sie sind nicht mehr als statische Felder anzusehen, sondern haben dynamischen Ursprung. Ihre Feldlinien brauchen nicht, wie es beim statischen Feld notwendig sein muß, Quellen zu haben, d. h. an Ladungen frei zu endigen, sondern bilden geschlossene Kurven. Die dynamischen Felder verdanken ihre Existenz

stets besonderen Einwirkungen nicht elektrischen Ursprungs, z. B. chemischen, thermischen Vorgängen, sowie dem induktiven Einfluß magnetischer Veränderungen. Solche energieliefernden Prozesse sind imstande, gewissen Raumgebieten elektromotorische Kräfte einzuprägen. In diesen Gebieten verschwindet dann das oben genannte Integral nicht und bildet ein Maß für die Größe der elektromotorischen Erregung. Sind die Gebiete mit leitender Substanz erfüllt, so findet unter dem Einfluß der elektromotorischen Kraft unter Energielieferung des sie erzeugenden Vorgangs (chemischer Prozeß im galvanischen Element, Wärmeentnahme des Thermoelements aus der Umgebung usw.) ein kontinuierliches Strömen von Elektrizität in geschlossener Bahn statt.

Literatur. ***M. Abraham und A. Föppl***, *Theorie der Elektrizität. Leipzig 1910.* — ***G. Mie***, *Lehrbuch der Elektrizität und des Magnetismus. Stuttgart 1910.* — ***H. Starke***, *Experimentelle Elektrizitätslehre. Leipzig 1910.*

H. Starke.

Elektrische Hilfsapparate.

1. Allgemeines über den Stromschluß. 2. Klemmen für schwache Leiter. 3. Klemmen für starke Leiter. 4. Steckvorrichtungen. 5. Ein- und Ausschalter. 6. Umschalter: a) Stromwender. b) Gruppenschalter. c) Linienwähler. 7. Sicherungen.

Die elektrischen Hilfsapparate dienen dazu, Leiterteile zu einem geschlossenen Leitungswege für den elektrischen Strom zu verbinden oder die Verbindung zu unterbrechen.

1. Allgemeines über den Stromschluß (Kontakt). Die einfache Berührung starrer Leiterteile gibt in der Regel keinen genügend sicheren Schluß; die auf den meisten Metallen sich bildenden dünnen Oxydschichten und anhaftender Staub bieten an der Berührungsstelle dem Strom einen merklichen Uebergangswiderstand, der namentlich durch seine starke Veränderlichkeit störend wirkt. Bei starken Strömen kann dieser „Wackelkontakt" zu unzulässigen Erwärmungen der Uebergangsstelle, unter Umständen sogar zum Abschmelzen der Leiter unter Lichtbogenbildung führen. Nur dort, wo bei der Ueberleitung geringer Elektrizitätsmengen der Uebergangswiderstand neben den übrigen Widerständen des Stromkreises nicht in Betracht kommt, gibt die einfache Berührung einen genügenden Schluß, z. B. bei elektrostatischen Versuchen und bei Hochspannung.

Im übrigen müssen die zu verbindenden Leiterteile mit gut gereinigten (am besten abgeschmirgelten) Flächen kräftig aneinandergepreßt werden. Je größer die Stromstärke, um so größer muß die Berührungsfläche und der anzuwendende Druck sein. Bei der Verbindung mit Kohle ist wegen deren geringer Leitfähigkeit ebenfalls eine große Auflagefläche erforderlich. Die Ueberleitung großer Energien bei niedriger Spannung verlangt besondere Sorgfalt bei der Herstellung der Verbindungen.

Wegen seiner nicht oxydierenden Oberfläche gibt Platin auf Platin auch bei schwachem Berührungsdruck noch einen sicheren Schluß für Stromstärken bis zu einigen Ampere, Verstaubung beeinträchtigt den Schluß.

Mit dem einzigen bei Zimmertemperatur flüssigen Metall, dem Quecksilber, lassen sich Verbindungen von sehr geringem Uebergangswiderstand herstellen, doch müssen die das Quecksilber berührenden Leiter gut amalgamiert sein.

Zum Amalgamieren beizt man Messing oder Kupfer mit verdünnter Salpetersäure blank und reibt sie mit Quecksilber ein oder man taucht sie in eine etwas saure Lösung von Quecksilber-Chlorid oder Nitrat. Nachher wäscht man mit Wasser und entfernt überschüssiges Quecksilber. Eisen muß zuvor in der Hitze verzinnt werden. Platin frisch gereinigt amalgamiert sich häufig von selbst beim Eintauchen in Quecksilber, sonst bringt man es als Kathode in eine Lösung von Quecksilbernitrat oder wendet Natriumamalgam an (Kohlrausch, Lehrb. d. prakt. Physik).

Den großen Vorzügen der Verbindungen mit Quecksilber, geringer Widerstand und einfache Herstellung, stehen die Mißstände gegenüber, daß es mit der Zeit verschmutzt und leicht verschüttet wird. Seine Verwendung sollte auf die Fälle beschränkt bleiben, in denen es sich durch starre Schlußstücke nicht ersetzen läßt.

2. Klemmen für schwache Leiter. Für Verbindung zweier Leitungen mit Kupferquerschnitten bis 4 qmm dienen Doppelklemmen aus Messing nach Figur 1, die blankgeschabten Enden der Drähte werden in den Löchern mit den Rändelschrauben festgeklemmt. Für hohe Spannungen (über 1000 Volt) werden die Kanten der Klemme abgerundet, Figur 2, um Spitzenentladungen zu vermeiden. Die Klemme, Figur 3, ermöglicht den Anschluß eines Drahtes an ein Blech, die Klemme, Figur 4, findet zur Verbindung zweier bandförmiger Leiter Verwendung.

Alle Lochklemmen haben den Nachteil, daß der Draht an der durch die Schraube gequetschten Stelle leicht abbricht, oder daß bei einer Bewegung des Drahtes die Klemmung sich lockert und Wackelkontakt ein-

Digitized by Google

tritt. Daher wird für den Leitungsanschluß bei modernen Apparaten nur noch selten

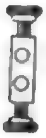


Fig. 1.

Fig. 2.

Fig. 3.

Fig. 4.

die Lochklemme, Figur 5, sondern meist die Flachklemme, Figur 6, verwandt. Bei dieser wird das hakenförmig gebogene Drahtende

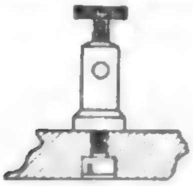


Fig. 5.

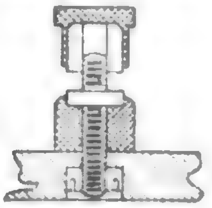



Fig. 6.

Fig. 7.

zwischen Sockel und Schraubenkopf gepreßt, die Auflagefläche ist groß und der Draht wird auch bei kräftigem Druck nicht abgequetscht. Man lege den Drahthaken im Rechts-Drehsinne um die Klemmschraube, sonst rutscht er beim Zuklemmen heraus. Figur 7 zeigt eine Flachklemme zum Verbinden zweier Leitungen.

In einer Anschlußklemme lassen sich mehrere Leitungen nicht gut gleichzeitig befestigen; es ist zweckmäßig in dem Anschluß einen Blechstreifen mit einer größeren Zahl von Klemmschrauben nach Figur 8 anzubringen, unter die die einzelnen Drähte geklemmt werden können. In ähnlich einfacher Weise sind die für provisorische Apparate als Anschlüsse recht geeigneten Tischklemmen, Figur 9, hergestellt, die mit Holzschrauben auf der isolierenden Unterlage befestigt werden. Lötet man in die Schnittschrauben einen Blechstreifen ein, Figur 10, so kann man sie mit der Hand festklemmen.

Fig. 8.

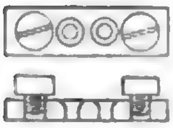


Fig. 9.

Fig. 10.

3. Klemmen für stärkere Leiter. Lochklemmen eignen sich für stärkere Kupferquerschnitte gar nicht. Oberhalb 16 qmm bestehen die Leiter in der Regel nicht mehr aus einem massiven Draht, sondern sind der Handlichkeit halber aus mehreren dünneren Drähten verseilt. Im Laboratorium verwendet man mit Vorliebe schmiegsame Litzenkabel, die aus einer sehr großen Zahl dünnster Drähte zusammengedrillt sind. Die Enden solcher Leiter werden in Kabelschuhe eingelötet und auch massive Leiter werden in der Regel des bequemeren Anschlusses

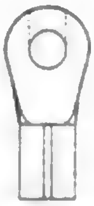


Fig. 11.

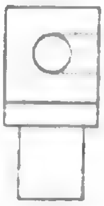



Fig. 12.

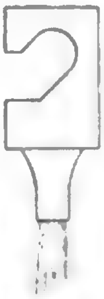



Fig. 13.

halber beschuht. Die leichten gepreßten Kabelschuhe, Figur 11, pflegen die starke mechanische Beanspruchung im Laboratorium nicht auszuhalten, schwere gegossene Schuhe Figur 12 sind vorzuziehen. Diese im Handel erhältlichen Kabelschuhe haben meist geschlossene Oesen, die aber zum bequemeren Anschließen ohne Nachteil für den Stromschluß aufgeschnitten werden können (gestrichelte Linien in Figur 11 und 12). Im Laboratoriumsgebrauch gut bewährt haben sich Schuhe aus Flachkupfer mit eingelötetem Rohransatz, Figur 13.

Zwei beschuhte Leiterenden werden durch einen Bolzen mit Mutter, Figur 14, zusammen geschraubt, die Verwendung von Unterlag-

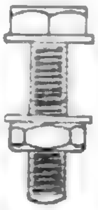


Fig. 14.

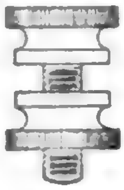



Fig. 15.

scheiben empfiehlt sich. Mit der Rändelklemme, Figur 15, läßt sich die Verbindung von Hand ohne Schraubenschlüssel gut herstellen. Die Anschlüsse an Apparaten sind Kupferklötze oder Lappen mit einer Kopfschraube, zu der meist ein Steckschlüssel beigegeben ist. Im allgemeinen soll der Stromschluß durch aufeinander gepreßte Flächen, nicht durch die Gewindegänge eines Bolzens bewirkt werden.

Fest verlegte Leitungen, an die bewegliche Leitungen für den Verbrauch anzuschließen

Digitized by Google

sind, pflegen in Klemmen zu endigen, die auf Marmor, Schiefer oder einem feuersicheren künstlichen Isoliermaterial montiert sind. Holz und das bei Erwärmung weich werdende Hartgummi sollte bei derartigen festen Einrichtungen als Unterlage für spannungsführende Teile auch im Laboratorium nicht mehr verwendet werden. Bequem sind Klemmen nach Figur 16, deren Gewindebolzen so lang ist, daß man eine größere Anzahl von Sechskantmuttern aufschrauben und damit mehrere Leitungen an eine Klemme anschließen kann. Es ist zweckmäßig, den Muttern einen ungewöhnlich großen Durchmesser zu geben, sie lassen sich dann meist schon mit der Hand genügend festziehen.

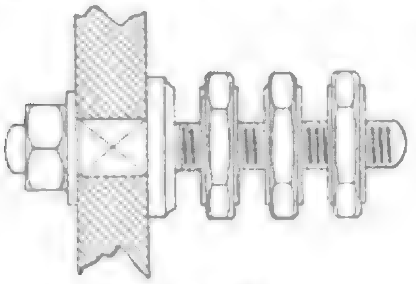


Fig. 16.

Einen Anhalt über die Belastbarkeit von Leitungen und Bolzen geben die folgenden dem Normalienbuch des Verbandes Deutscher Elektrotechniker entnommenen Tabellen; die Leiter nehmen bei Dauerbetrieb mit der angegebenen Stromstärke eine Uebertemperatur von 25° C an.

Querschnitt der Gummiaderleitung in qmm	Stromstärke in Ampere
0,75	9
1	11
1,5	14
2,5	20
4	25
6	31
10	43
16	75
25	100
35	125
50	160
70	200
95	240
120	280
150	325
185	380
240	450

Stromstärke in Ampere	Durchmesser für Anschlußbolzen		Schraubendurchmesser für den Klemmkontakt
	Messing	Kupfer	
10	3	3	3
25	4,5	4,5	4,5
60	6	6	6
100	8	7	7
200	12	10	9
350	20	14	12
600	—	20	16
1000	—	30	20

Die Auflagefläche muß gleich der Ringfläche der Unterlegscheibe (die den doppelten Durchmesser des Anschlußbolzens hat) sein.

4. Steckvorrichtungen. Bequemer als mit Klemmen gestaltet sich der Anschluß beweglicher Leitungen an fest verlegte mit einer Steckvorrichtung (Fig. 17 und 18). Die feste Leitung ist in einer Dose an eine zylindrische Messinghülse angeschlossen, in die der Stecker, ein geschlitzter und dadurch

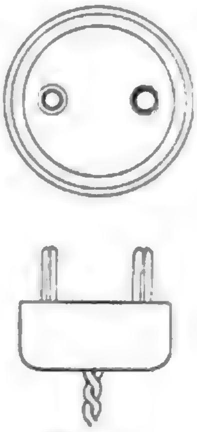


Fig. 17.

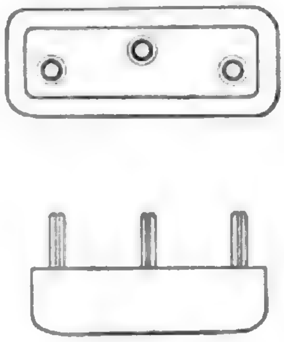


Fig. 18.

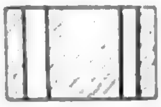


Fig. 19.

federnder Messingstift mit Reibung eingeführt wird; der Stecker ist mit der beweglichen Leitung verbunden. Die im Handel als Installationsmaterial erhältlichen Steckvorrichtungen sind zweipolig oder dreipolig und meist für die Stromstärken 6, 10, 20 und 30 Ampere abgestuft. Für 6 und 25 Ampere sind die Abmessungen vom VDE normalisiert. Sind die beiden Hülsen einer zweipoligen Dose — und entsprechend die Stifte des Steckers — von verschiedener Weite, so ist die Polarität unverwechselbar, was z. B. für den Anschluß von Nernstlampen zweckmäßig ist. Die Dose ist meist aus Porzellan, der Stecker der geringeren Zerbrechlichkeit halber aus einem künstlichen Isoliermaterial hergestellt. Die zweipoligen Steckvorrichtungen für 6 und 10 Ampere geben auch bei niedriger Spannung guten Stromschluß und können unbedenklich in Meßschaltungen verwendet werden, wenn man von Zeit zu Zeit die geschlitzten Stecker zur Aufrechterhaltung der Federung mit einer Messerklinge aufspreizt. Für größere Stromstärken sind einpolige Steckvorrichtungen des sichereren Stromschlusses halber vorzuziehen; oberhalb etwa 60 Ampere ist die Verwendung von Steckern wegen des verhältnismäßig geringen Kontaktdruckes bedenklich.

An die Stecker werden als Leitungen meist schmiegsame Schnüre angeschlossen, die Enden dieser Litzendrähte müssen gut verlötet sein, einzeln herausstehende Drähtchen geben Veranlassung zu Kurzschluß im Stecker.

Zur Verbindung zweier mit Steckern ver-

Digitized by Google

sehenen Leitungen ist ein isolierendes Zwischenstück mit zwei passenden Messinghülsen (Fig. 19) bequem.

5. Ein- und Ausschalter. Zum Schalten schwacher Ströme ist der Taster Figur 20

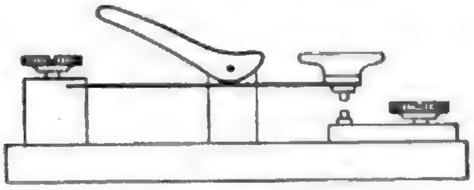


Fig. 20.

geeignet, er besteht aus einer Blattfeder mit einem Platinstift, der beim Niederdrücken des Griffes auf einen zweiten Platinstift gepreßt wird; durch Umlegen eines Knacken kann die Feder dauernd niedergehalten werden. Ferner werden in der Schwachstromtechnik die in Figur 21 skizzierten Schalter verwandt, doch können an die Güte des Kontaktes keine hohen Anforderungen gestellt werden.

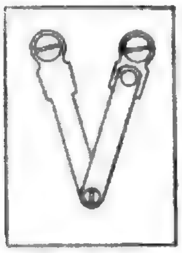


Fig. 21.

Bei den älteren Hebelschaltern einfachster Bauart ist häufig der Stromschluß an der Drehstelle des Schaltstückes unzuverlässig, da keine Federung für den Kontaktdruck vorgesehen ist. Der moderne Hebelschalter Figur 22 (der als Massenfabrikat zu sehr niedrigem Preise hergestellt wird) besteht aus einem Schaltmesser, das zwischen zwei federnden Lamellen, die durch Druck und Reibung einen guten Stromschluß gewährleisten, drehbar gelagert ist; beim Einschalten schiebt es sich zwischen zwei andere federnde Lamellen. In der Regel sitzt der

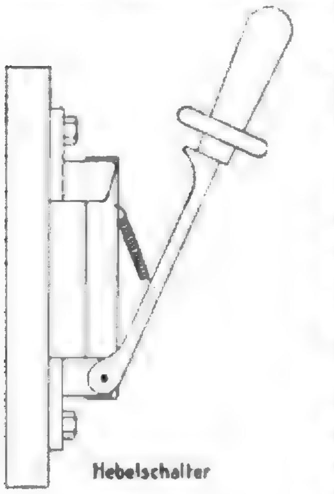


Fig. 22.

Handgriff nicht unmittelbar auf dem Messer, sondern an einem um den gleichen Drehpunkt beweglichen Hebel, der mit dem Messer durch eine Feder verbunden ist. Beim Ausschalten bewegt sich zunächst nur der Hebel unter Anspannung der Feder, die dann das Messer plötzlich herausschnellt. Diese „Momentausschaltung“ bewirkt ein schnelles Abreißen des sich beim Ausschalten bildenden Lichtbogens. Bei einigen Konstruktionen dienen der Momentausschaltung besondere Abreißkontakte. Im Laboratorium ist in manchen Fällen diese Momentausschaltung gewiß nicht notwendig, da sie aber für technische Schalter vom Verbande Deutscher Elektrotechniker vorgeschrieben ist, so werden Schalter ohne diese Einrichtung nur für besondere Zwecke (Ausschalter für Maschinenerregungen) und für große Stromstärken als Trennschalter, die nur unbelastet betätigt werden, hergestellt.

Um mechanisch haltbar zu sein, sind die kleinsten Hebelschalter so bemessen, daß sie mit etwa 20 Ampere belastet werden können. Die Schalter werden 1-, 2- und 3-polig hergestellt. Die sich reibenden Flächen des Schaltmessers müssen von Zeit zu Zeit mit einem Hauch Vaseline gefettet werden, sonst fressen sie sich ein und die Feder bricht; dem Stromschluß ist das Fetten nur günstig. Ist die von dem Schalter zu unterbrechende Energie so groß, daß beim Ausschalten ein kräftiger Lichtbogen entsteht, so muß der Schalter in senkrechter Lage befestigt werden, damit der Lichtbogen nach oben ausgeblasen wird. Beim Schalten größerer Energiemengen muß der Schalter kräftig eingelegt und beim Ausschalten rasch herausgerissen werden, sonst entstehen Schmelzperlen, die den Stromschluß beeinträchtigen. In dieser Hinsicht schädlich ist namentlich ein probeweises, nur kurz berührendes Schließen des Schalters. Schmelzperlen werden mit der Feile entfernt.

Wird die auf dem Schaltmesser aufgeschlagene Nennstromstärke für eine längere Dauer erheblich überschritten, so ermattet durch die übermäßige Erwärmung (80 bis 100° C) die Federkraft der Lamellen unwiederbringlich und ein Wachsen des Uebergangswiderstandes ist die Folge. Auf den Messern ist ferner noch die Nennspannung angegeben, bei welcher der Schalter benutzt werden kann, 250 oder 550 Volt. Allerdings kann man bei dieser Nennspannung nicht die Nennstromstärke, also die volle Leistung, bei Gleichstrom ausschalten, bei einpoligen Schaltern würde ein Lichtbogen stehen bleiben, bei zweipoligen Schaltern würden die beiden Lichtbogen zusammenschlagen und einen Kurzschluß der Energiequelle herbeiführen. Einige Firmen geben die ausschaltbare Leistung auf kleinen, am Griff der Schalter befestigten Schildern an.

Die zum Schalten von Lampen und Kleinmotoren üblichen Dosenschalter bestehen aus Messingfedern, die an einer isolierenden ruckweise drehbaren Walze befestigt sind, beim Einschalten legen sich die Federn gegen kleine Kontaktklötze. Vor der Verwendung dieser Dosenschalter in Meßschaltungen muß gewarnt werden,

Digitized by Google

da bei dem geringen Kontaktdruck der Uebergangswiderstand zu veränderlich ist.

Wo es auf sehr gute Isolierung ankommt, bei elektrostatischen Versuchen und bei Hochspannung, verwendet man häufig als Schalter zwei Quecksilbernäpfe, in die ein Kupferbügel, den man an einer Hartgummi- oder Siegellackstange hält, eingetaucht wird. Die Quecksilbernäpfe sind Fingerhüte, in Paraffin eingegossen, oder auch nur Höhlungen in einem Paraffinklotz, die Zuführungsdrähte werden warm in das Paraffin eingedrückt und ragen in die Höhlungen hinein. Noch bessere Isolation ist gewährleistet, wenn jeder Napf einzeln auf einem Hartgummisäulchen sitzt, das zur Verlängerung des Kriechweges mit Eindrehungen versehen ist.

Bewegliche Leiterteile, die, ohne in ihrer Bewegung wesentlich gehemmt zu werden, einen Stromschluß herbeiführen sollen, z. B. Uhrpendel, läßt man mit einem Platinstift eine Quecksilberfläche berühren oder eine Quecksilberkuppe durchschneiden. Mit einer Spitze aus dünnem Platinblech, die man gegen die hohe Kante senkrecht über einen ausgespannten Platindraht wegstreifen läßt, erzielt man einen guten, sehr kurz dauernden Stromschluß (Feußner). Wegen des Oeffnungsfunkens können mit diesen Einrichtungen nur schwache Ströme geschaltet werden, sind stärkere Ströme in dieser Weise zu schließen und zu öffnen, so muß ein Relais zwischengeschaltet werden.

6. Umschalter. 6a) Stromwender (Kommutator). Wenn der zu beobachtende Vorgang, sei es seiner Natur nach, sei es durch störende Einflüsse von elektrischen oder magnetischen Kräften (Thermoströme, Erdfeld) von der Stromrichtung abhängig ist, so ist die Verwendung eines Apparates, der die schnelle und bequeme Umkehrung der Stromrichtung bewirkt, angebracht. Der einfachste Stromwender besteht aus vier Quecksilbernäpfen, Figur 23, in die zwei durch ein Isolierstück gehaltene Kupferbügel eintauchen,

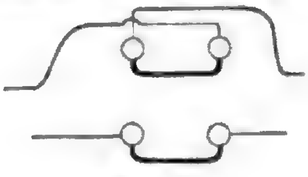


Fig. 23.

die Polvertauschung geschieht durch Umsetzen der Bügel um 90°. Bei geeigneten Abmessungen ist dieser Stromwender auch für hohe Stromstärken verwendbar. Dem gleichen Zweck dient die Wippe mit 8 paarweise verbundenen Quecksilbernäpfen nach Figur 24. Beim Herunterklappen der aus einem Isolierstück bestehenden Wippe nach links verbinden die Kupferbügel die Näpfe 1 mit 2 bezw. 3 mit 4. Beim Umkippen der Wippe nach der anderen Seite werden durch

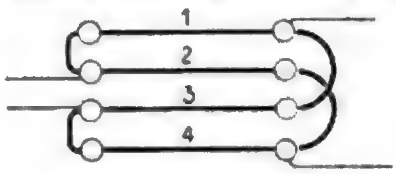


Fig. 24.

zwei andere Bügel die Näpfe 1 mit 3 bezw. 2 mit 4 verbunden. An das mittlere Näpfepaar wird z. B. die Energiequelle, an das äußere Paar die Verbrauchsleitungen gelegt.

Sehr verbreitet ist die Pohlsche Wippe mit 6 Quecksilbernäpfen, Figur 25, von

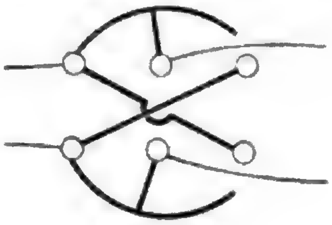


Fig. 25.

denen je zwei äußere diagonal gegenüberliegende miteinander verbunden sind. Die beiden durch ein Isolierstück verbundenen dreiarmigen Bügel stehen mit den mittleren Armen in den mittleren Näpfen und tauchen mit den äußeren Armen je nach der Lage der Wippe in die äußeren Näpfe rechts oder links. Die Stromwendung erfolgt durch Umlegen der Wippe. An die mittleren Näpfe ist z. B. die Energiequelle, an zwei äußere die Verbrauchsleitung angeschlossen. Wünschenswert ist bei den Wippen eine Stellfeder, die zum Ausschalten die Wippe in der Mittelstellung festhält.

Wenn das Quecksilber verschmutzt und amalgamhaltig ist, können bei schnellem Umlegen der Wippen die herausfahrenden Bügelenden aus den Näpfen Quecksilberfäden nachziehen, die noch nicht abgerissen sind, wenn die Bügel auf der anderen Seite bereits in die Näpfe eintauchen; es entsteht dann ein Kurzschluß der Energiequelle, der unheilvoll werden kann für die zwischen der Energiequelle und der Wippe liegenden Apparate (z. B. Präzisionsstrommesser, in denen der Strom nicht kommutiert werden darf). Es empfiehlt sich deshalb, etwa im Kreise vorhandene Ballastwiderstände zwischen Energiequelle und Wippe zu schalten.

In sehr vielen Fällen wird die Quecksilberwippe besser durch einen Hebelumschalter, Figur 26, ersetzt, bei dem wie bei der Pohlschen Wippe die diagonalliegenden äußeren Klemmen kreuzweise verbunden

Digitized by Google

sind. Der Hebelumschalter ist in ähnlicher Weise gebaut wie der Ausschalter.

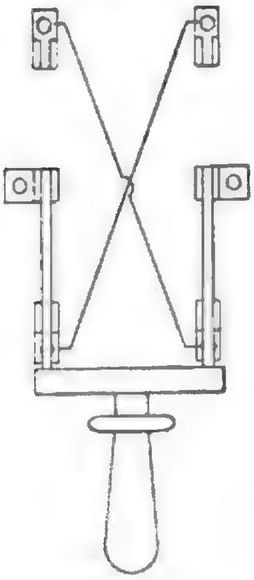


Fig. 26.

Bei Induktorien findet man häufig zylindrische Stromwender (Fig. 27), sie bestehen aus zwei halb ausgeschnittenen und entsprechend ineinander greifenden Metallrohren, die auf einer drehbaren Walze voneinander isoliert befestigt sind; jedes Metallrohr verbindet eine der äußeren Schleiffedern mit einer mittleren. Durch Drehen der Walze um 180° wird der Strom gewendet. Bisweilen sind auch nur zwei Halbzylinder auf der Walze befestigt und mit den voneinander isolierten Achsenhälften verbunden. Die Stromzuführung zu den Achsen muß dann aber auch durch Schleiffedern erfolgen, durch die Achsenlager ist sie unzuverlässig.

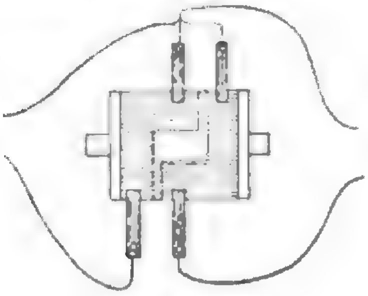


Fig. 27.

6b) Gruppenschalter. Sind zwei oder mehrere Gruppen von Energiequellen oder von Magnetspulen, Transformatorentwickelungen u. ä. bald in Reihe, bald nebeneinander zuschalten, so ist es bequemer und zuverlässiger, diese Schalthandlung mit einer festen Einrichtung vorzunehmen. Figur 28 zeigt das Schema einer Reihen- und Nebenschlußschaltung von zwei Gruppen mit einem zweipoligen Hebelumschalter, Figur 29 die Umschaltung von drei Gruppen mit vier gekuppelten Umschaltern. Liegen die Hebel nach oben, so sind die Gruppen in Reihe geschaltet, durch Umschalten der Hebel nach unten kommen die Gruppen nebeneinander zu liegen. Für n-Gruppen sind 2(n—1) Umschalthebel erforderlich, bei großer Gruppenzahl ist daher die Verwendung von Hebelschaltern sehr kostspielig; Quecksilbernäpfe sind vorzuziehen, bei diesen ist auch die Kombinationsmöglichkeit der Gruppen eine größere, was z. B. bei einer Batterie, die unter gleichmäßiger Belastung aller Zellen auf verschiedene Spannungen

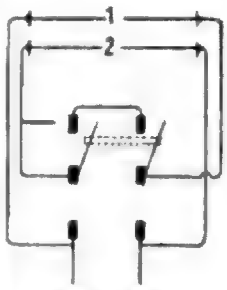


Fig. 28.

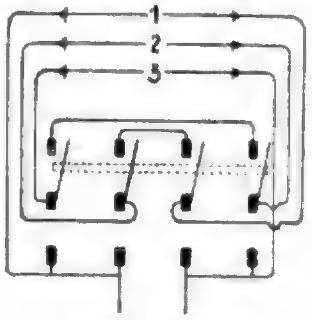


Fig. 29.

geschaltet werden soll, wichtig ist. An eine Reihe Näpfe werden dann die positiven Pole aller Gruppen angelegt, an eine parallele Reihe Näpfe die negativen. Durch Einlegen von Kupferbügeln, die zweckmäßigerweise in der gewünschten Anordnung auf einer Isolierplatte befestigt sind, werden die Näpfe verbunden. Es empfiehlt sich, für jede Kombination der Gruppen eine feste Anordnung der Bügel herzustellen, ein Irrtum beim Einlegen loser Bügel gefährdet die Batterie.

Es sind auch Gruppenschalter für die Spulen von Meßinstrumenten sowohl, wie für Batterien nach dem bei der Regulierung von Straßenbahnmotoren üblichen Kontrollersystem gebaut. Kontaktklötze auf einer Isolierwalze stellen zwischen Federn, die auf ihnen schleifen, die erforderlichen Verbindungen her. Bei einer Drehung der Walze gibt eine andere Anordnung der Kontaktklötze eine andere Gruppenschaltung. Die dauernde Aufrechterhaltung eines zuverlässigen Stromschlusses bei größeren Stromstärken dürfte bei dieser gegen Staub empfindlichen Anordnung schwierig sein.

6c) Linienwähler. Diese gestatten aus einer größeren Zahl von Leitungen wahlweise eine Leitung mit einer anderen zu verbinden. Der Hebelumschalter und die Pohlsche Wippe nach Herausnahme der Kreuzverbindungen gestatten ein Leitungspaar abwechselnd mit zwei anderen Leitungspaaren zu verbinden. Die Auswahl einer einzelnen aus einer größeren Zahl von Leitungen ist möglich bei einer Kurbel, die über eine Reihe von Kontaktstücken schleift; die Kurbeln werden auch doppelarmig für zweipoligen Leitungsanschluß hergestellt; meist dienen sie dazu, um mit einem Spannungsmesser der Reihe nach bei einer größeren Zahl von Leitungen die Spannung oder — zur Strommessung — den Spannungsabfall an eingebauten Nebenschlußwiderständen zu messen. Die Stromzuführung zur Kurbel erfolgt entweder durch ein spiralig aufge-

Digitized by Google

wickeltes Band, das die Bewegung nicht hindert, oder durch einen koaxialen Ring, auf dem die Kurbel mit einer Feder schleift.

Eine große Freiheit in der Kombination von Leitungen läßt sich mit Steckvorrichtungen erzielen. Den Nachteil dieser Anordnung: das Gewirr sich kreuzender Schnüre vermeidet der Linienwähler aus gekreuzten Schienen. Eine Gruppe Leitungen ist an horizontale Schienen gelegt, eine andere Gruppe an vertikale Schienen. An den Kreuzungsstellen lassen sich die Schienen durch Stöpsel verschrauben und so kann jede Schiene der einen Gruppe mit jeder Schiene der anderen Gruppe verbunden werden. Um Kurzschlüsse zu vermeiden sind die beiden Schienengruppen auf verschiedenen Seiten der Marmortafel befestigt, die Tafel ist an den Kreuzungspunkten durchbohrt. Siemens & Halske bauen für solche Linienwähler einen Stöpsel, der die durchbohrten Schienen durch ein Rohrstück verbindet, durch Drehen des Griffes wird das Rohr von zwei Konussen aufgetrieben und in die Schienenbohrungen gepreßt.

7. Sicherungen. Um Leitungen und Apparate vor Zerstörung durch zu hohe Stromstärken zu sichern, wird in die Leitung ein Draht oder Blech eingeschaltet, das beim Ueberschreiten einer gewissen Stromstärke unschädlich durchschmilzt. Bei Lichtanlagen und anderen fertigen Installationen sind die Sicherungsdrähte in Porzellanpatronen, die mit feinem sehr trockenem Sand gefüllt sind, eingeschlossen; die Patronen sollen bei der Betätigung den Schmelzdraht geräuschlos durchschmelzen lassen und sind leicht gegen eine neue auszuwechseln. Die älteren Patronen aber können bei Kurzschluß und sogar bei langsam steigender Ueberlastung hinter großen Energiequellen in ganz gefährlicher Weise explodieren, wie Versuche des Verbandes Deutscher Elektrotechniker zeigten. Der Grund lag an der geringen Widerstandsfähigkeit der Patronen gegen den hohen inneren Druck und an der ungenügenden Dichtung der Einführungsstellen. Die neuen Patronen der D-Type, Fig. 30, sind sehr kräftige zylindrische

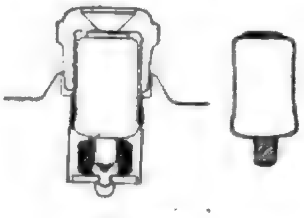


Fig. 30.

Porzellankörper, die sorgfältig gedichtet sind und auch einen Kurzschluß unter den schwersten Bedingungen gefahrlos unterbrechen. Beim Einsetzen des Stöpsels wird ein Kopf mit Edisongewinde darüber geschoben und im Sockel verschraubt. Die Stromzuführung erfolgt einerseits durch die Verschraubung des Kopfes zu der oberen Kontaktplatte der Patrone, andererseits durch ein Paßstück zu dem Kontaktzylinder am unteren Ende der Patrone. Das Loch in der Isolierbuchse des Paßstückes und der Durchmesser des Kontaktzylinders der Patrone wachsen stufenweise mit der Nennstromstärke der Sicherung. Es wird dadurch verhindert, daß unbefugt eine zu starke Sicherung eingesetzt wird, denn das Paßstück läßt sich nur mit einem besonderen Schlüssel einschrauben. Die D-Patronen werden von den Siemens-Schuckertwerken, von der A.-E.-G. und von Voigt & Haeffner hergestellt und zwar bis zu 200 Ampere. Vor der Verwendung von reparierten Stöpseln muß wegen der Explosionsgefahr gewarnt werden, die Hersteller lassen sich in der Regel auf eine Reparatur nicht ein, da die sachgemäße Ausführung wenig billiger ist als die Neuanfertigung.

In Versuchsleitungen und für höhere Stromstärken werden meist offene Sicherungen (Fig. 31) benutzt, frei zwischen Klemmen ausgespannte Drähte von 6 bis 10 cm Länge. Zur Sicherung bei niedrigen Stromstärken nimmt man sehr dünne Drähte aus Widerstandsmaterial, sonst Kupfer- oder Silberdrähte. Sicherungen aus Bleistreifen haben eine gewisse Trägheit, was für Motoren z. B. erwünscht ist. Das Umherspritzen glühender Metallteile bei Kurzschluß verhindert eine über die Sicherung gedeckte Pappkappe. Zweipolige offene Sicherungen dürfen nicht wagerecht so angeordnet werden, daß ein Schmelzdraht oberhalb den anderen liegt, beim Abschmelzen des unteren Drahtes würde durch den entstehenden Lichtbogen ein gefährlicher Kurzschluß zwischen den Klemmen, an denen die Energiequelle liegt, entstehen.

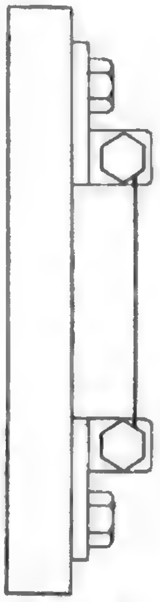


Fig. 31.

Literatur. **Kohlrausch**, *Lehrbuch der praktischen Physik, Leipzig 1910. — Normalien des Verbandes Deutscher Elektrotechniker, Berlin 1911. — Handbücher der Elektrotechnik von* **Kittler, Heinke, Strecker.** *— Preislisten der Firmen: Allgemeine Elektrizitätsgesellschaft Berlin, Bergmann Elektrizitätsgesellschaft Berlin, Dr P. Meyer, Berlin, Siemens & Halske und Siemens & Schuckert, Berlin, Voigt & Häffner, Frankfurt a. M.*

H. Schering.

Elektrische Influenz.

1. Leiter im elektrischen Feld im Vakuum: a) Grundtatsachen. b) Allgemeine Begründung aus der Theorie der Elektrizität. c) Anwendungen: Elektrophor; Influenzmaschine. d) Lösung spezieller Fälle: Platten- und Kugelkondensator. e) Methode der elektrischen Bilder. 2. Leiter im elektrischen Feld im homogenen Dielektrikum: a) Einfluß des Mediums auf die Erscheinung. Gleichungen der Elektrostatik im homogenen Medium. b) Lösung spezieller Probleme. 3. Inhomogenes Dielektrikum (Nichtleiter im elektrischen Felde): a) Herleitung der Erscheinungen aus der Theorie der Elektrizität. b) Lösung spezieller Fälle. 4. Energie und ponderomotorische Kräfte im elektrischen Felde: a) Die elektrostatische Energie. b) Ponderomotorische Kräfte.

1. Leiter im elektrischen Feld im Vakuum. 1a) Grundtatsachen. Neben den direkten Methoden, isolierte Leiter zu elektrisieren (z. B. durch Kontakt zweier verschiedener Metalle, durch Reibung, durch Berührung mit schon geladenen Substanzen), gibt es noch eine mehr indirekte. Diese besteht darin, daß man den Leiter (isoliert oder nicht isoliert) in ein auf irgendeine Weise erzeugtes elektrisches Feld bringt. Dann treten auf dem Leiter Ladungserscheinungen auf; die Ladungen nennt man im Gegensatz zu den durch die direkten Methoden erzeugten „influenzierte" Ladungen, und die Gesamtheit dieser Erscheinungen bezeichnet man als die Lehre von der „Influenzelektrizität". Wie wir im folgenden sehen werden, ist dies überhaupt das allgemeine Problem der Elektrostatik. Wir beschränken uns zunächst auf die im Vakuum auftretenden Erscheinungen. Zunächst seien einige einfache Experimente besprochen, die die Erscheinung der Influenz vor Augen führen.

In die Nähe eines elektrisch geladenen Metallkörpers (Konduktor) (er sei etwa positiv) werde ein zweiter Leiter B gebracht (Fig. 1); derselbe ist unelektrisch, wie daraus

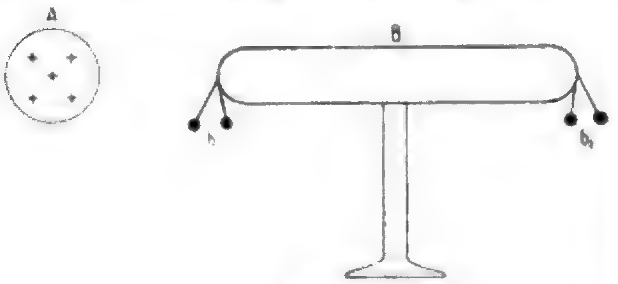


Fig. 1.

hervorgeht, daß zwei an seinen Enden befindliche Blattelektroskope b_1 und b_2 nicht ausschlagen.

Wird nun dieser isolierte Körper B in das elektrische Feld gebracht, d. h. dem Körper A hinreichend genähert, so schlagen beide Elektroskope aus, wie es die Figur zeigt. B nimmt also „durch Influenz" Ladungen an. Entfernt man B aus dem elektrischen Felde, so fallen b_1 und b_2 wieder zusammen, d. h. B ist wieder unelektrisch geworden. Dies gilt aber nur, wenn B stets isoliert gehalten wurde.

Speziell sei der Leiter B aus 2 isolierten Stücken bestehend, B_1 und B_2, nach Figur 2.

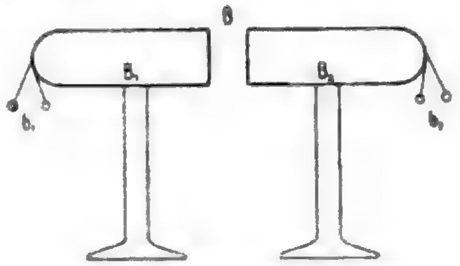


Fig. 2.

Beide Teile seien unelektrisch und zunächst miteinander zur Berührung gebracht, so daß wir, wie vorhin, einen einzigen Metallkonduktor B haben. Sie werden in dieser Weise ins Feld gebracht, genau wie vorhin. Nachdem dann die beiden Elektroskope b_1 und b_2 eine Ladung auf dem jetzt noch einheitlichen Leiter B anzeigen, wird letzterer im Felde des Körpers A in seine beiden Teile getrennt. Entfernt man die beiden Hälften B_1 und B_2 nunmehr aus dem Felde, so erweisen sich beide Stücke als geladen. Mit Hilfe einer Probekugel zeigt man leicht, daß B_1 (d. h. der dem elektrisierten Körper A nähere Teil von B) negativ (d. h. ungleichartig mit A), B_2 (d. h. der von dem Körper A weiter entfernte Teil von B) positiv (d. h. gleichartig) geladen ist. Endlich bringt man außerhalb des Feldes B_1 und B_2 wieder zur Berührung, dann zeigen die Elektroskope b_1 und b_2 durch ihr Zusammenfallen an, daß B_1 ebenso stark negativ, wie B_2 positiv geladen war.

Man kann sich also vorstellen, daß unter dem Einfluß der von A ausgehenden elek-

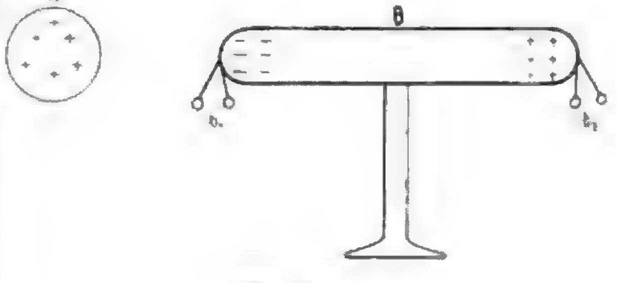


Fig. 3.

trischen Kräfte die auf dem neutralen Körper B in gleicher Menge befindlichen (sich daher ausgleichenden) Mengen positiver und negativer Elektrizität getrennt werden, so daß

Digitized by Google

die ungleichnamige angezogen, die gleichnamige abgestoßen wird (Fig. 3).

Leitet man den Körper B, während er noch im Felde ist, zur Erde ab, so verschwindet die abgestoßene gleichnamige Ladung, und es bleibt nur die angezogene ungleichnamige zurück. Entfernt man nach dieser Manipulation B aus dem Felde, so behält es seine Ladung, die ungleichnamig mit der von A ist, bei.

1b) Allgemeine Begründung aus der Theorie der Elektrizität. Wir wollen der Einfachheit halber annehmen, daß der das primäre elektrische Feld erzeugende Körper A eine mit der Ladung + e versehene Kugel sei. Ist diese allein im Vakuum vorhanden, so ist aus Symmetriegründen das Feld leicht angebbar: Die elektrische Kraft ist überall radial vom Kugelzentrum fortgerichtet, und die Niveauflächen (die Flächen gleichen Potentials) sind dementsprechend konzentrische Kugelflächen (Fig. 4). Werden die Kraftlinien nach Faradays Vorschrift konstruiert, so gehen von A $4\pi e$ Kraftlinien aus. Es sei daran erinnert, daß negative Ladung in der Sprache Faradays gleichbedeutend mit dem Einmünden oder Endigen einer bestimmten Kraftlinienzahl auf einem Körper ist. Die Kraftlinien stehen stets senkrecht auf den Niveauflächen. Da die Oberfläche leitender Körper stets eine solche ist, so entspringen und endigen im Gleichgewichtszustande die Kraftlinien stets senkrecht auf den Leitern. Denken wir uns

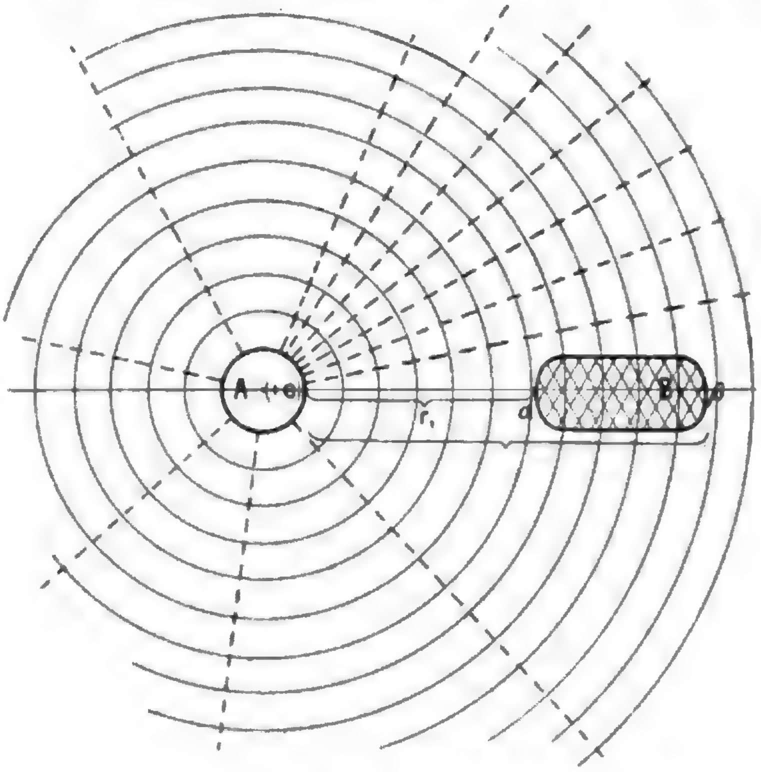


Fig. 4.

nun in das Feld von A den in Figur 4 schraffierten leitenden Körper B gebracht. Zwei Punkte α und β mögen die Entfernungen r_1 und r_2 vom Mittelpunkte von A haben. Dann

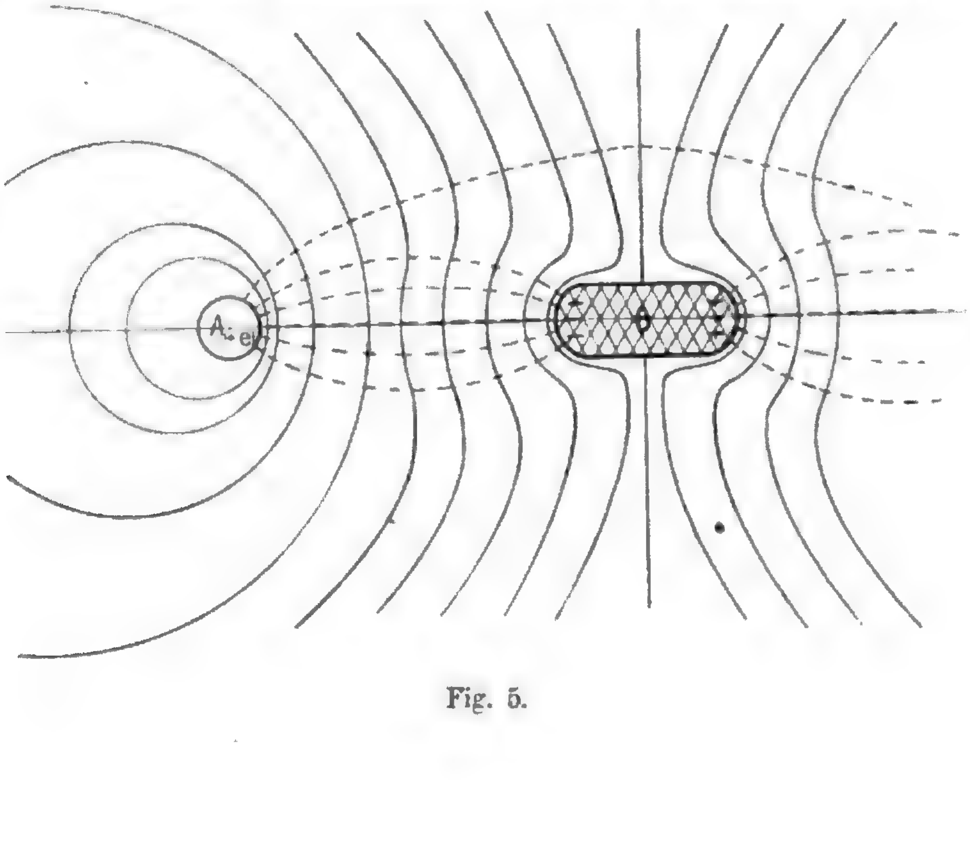


Fig. 5.

herrscht im Punkte α das Potential $\frac{e}{r_1}$ im Punkte β des Leiters B das Potential $\frac{e}{r_2}$ das von $\frac{e}{r_1}$ verschieden ist. Da aber im elektrostatischen Zustande ein Leiter stets konstantes Potential hat, folgt hieraus, daß das ursprüngliche Feld nicht bestehen bleiben kann, sondern durch Einbetten eines Leiters B deformiert werden muß, und zwar in der Weise, daß die Oberfläche von B zur Niveaufläche wird. Es müssen daher von B jetzt selbst Kraftlinien ausgehen, mit anderen Worten B erhält Ladungen, die man eben als „influenzierte" bezeichnet. In Figur 5 sind angenähert die Niveauflächen (ausgezogen) und die Kraftlinien (gestrichelt) dargestellt.

Man erkennt also, daß von den von A ausgehenden Kraftlinien ein Teil in dem A zugewandten Teile von B endigt (d. h. es tritt dort eine negative Ladung auf), und daß in dem von A abgewendeten Teile von B eine gleichgroßeAnzahl von Kraftlinien wieder entspringt (es tritt eine gleichgroße positive Ladung auf).

Ganz analog ist die Erklärung in komplizierteren Fällen, wo in ein beliebiges Feld beliebige Leiter eingebettet werden. Die zu lösende Aufgabe ist also die folgende: Gegeben eine Anzahl elektrischer Ladungen in gewisser geometrischer Konfiguration, d. h. gegeben ein primäres elektrisches Feld, und eine Anzahl von Leitern, die in das primäre Feld eingebettet sind. Zu bestimmen ist das nunmehr resultierende Feld. Das ist das allgemeine elektrostatische Problem. Es gibt keine allgemeine Methode zu seiner Lösung, so daß nur wenige spezielle Fälle bisher haben bewältigt werden können. Zur Lösung besitzen wir die Maxwellschen Gleichungen der Elektrizität, die wir hier für den Fall der Elektrostatik im Vakuum zu spezialisieren haben. Im folgenden sind die Grundlagen dieser Gleichungen kurz an gedeutet:

Erfahrungsgemäß kann man — ebenso wie im Schwerefeld der Erde, — durch Herumführen einer elektrischen Ladung auf geschlossener Kurve keine Arbeit aus dem elektrischen Felde gewinnen. Bezeichnet man durch $\mathfrak{E}$ den Vektor der elektrischen Kraft, durch $\mathfrak{E}_x$, $\mathfrak{E}_y$, $\mathfrak{E}_z$ seine Komponenten, so wird dies analytisch ausgedrückt durch die Gleichungen:

$$(1)\quad \left\{\begin{aligned} \frac{\partial \mathfrak{E}_z}{\partial y} - \frac{\partial \mathfrak{E}_y}{\partial z} &= 0 \\ \frac{\partial \mathfrak{E}_x}{\partial z} - \frac{\partial \mathfrak{E}_z}{\partial x} &= 0 \\ \frac{\partial \mathfrak{E}_y}{\partial x} - \frac{\partial \mathfrak{E}_x}{\partial y} &= 0 \end{aligned}\right.$$

Ferner sagt der Gaußsche Satz aus, daß der Kraftfluß $\int \mathfrak{E}_n \, df_i$ durch eine geschlossene Oberfläche f_i gleich der 4π-fachen Menge der eingeschlossenen Ladung e_i ist. In Formel:

$$(2)\quad \int \mathfrak{E}_n \, df_i = 4\pi e_i.$$

Dabei ist, wie stets im folgenden, mit n die äußere Normale der Fläche bezeichnet. Nun kommt die Ladung im Vakuum im allgemeinen nicht räumlich verteilt vor. Wir werden deshalb die räumliche Dichte der Elektrizität ϱ gleich Null annehmen, dann liefert (2) für räumliche Ladung:

$$(3)\quad \frac{\partial \mathfrak{E}_x}{\partial x} + \frac{\partial \mathfrak{E}_y}{\partial y} + \frac{\partial \mathfrak{E}_z}{\partial z} = 0$$

und für Flächenladungen, die nur an Leiteroberflächen sitzen können:

$$(4)\quad \mathfrak{E}_n = 4\pi\eta.$$

Dabei ist die Flächendichte der Elektrizität mit η bezeichnet. Endlich ist im Innern der Leiter stets das elektrische Feld gleich Null, also:

$$(5)\quad \mathfrak{E} = 0 \text{ (im Innern von Leitern).}$$

Die Gleichung (1) ist gleichbedeutend damit, daß die elektrischen Kraftkomponenten sich sämtlich aus einer Funktion φ, dem Potential, durch Differentiation ableiten lassen; also kann an Stelle von (1) auch treten:

$$(6)\quad \mathfrak{E}_x = -\frac{\partial \varphi}{\partial x},\ \mathfrak{E}_y = -\frac{\partial \varphi}{\partial y},\ \mathfrak{E}_z = -\frac{\partial \varphi}{\partial z}$$

Damit wird der Gaußsche Satz:

$$(7)\quad \int \frac{\partial \varphi}{\partial n} df_i = -4\pi e_i.$$

Diese Gleichungen liefern in (3) eingesetzt, die damit äquivalente Gleichung:

$$(8)\quad \Delta\varphi = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0$$

und mit (4):

$$(9)\quad \frac{\partial \varphi}{\partial n} = -4\pi\eta \text{ (für Leiteroberflächen).}$$

Endlich ist nach (5) φ auf jedem Leiter konstant, also etwa für den iten Leiter:

$$(10)\quad \varphi = \varphi_i = \text{Const.}$$

Man kann also das Problem auch so formulieren: Gesucht eine Funktion φ, die im ganzen Raume der Gleichung (8) $\Delta\varphi = 0$ gehorcht, die an gewissen gegebenen Flächen die Bedingung erfüllt $\frac{\partial \varphi}{\partial n} = -4\pi\eta$, und auf diesen Flächen und im Innern desselben konstante Werte φ_i annimmt. Das ist eine Aufgabe der Potentialtheorie; ist φ gefunden, so ergeben sich nach (6) die Kraftkomponenten. Man kann allgemein zeigen, daß, wenn r der Abstand eines beliebigen Punktes (x y z), für den φ berechnet werden

Digitized by Google

soll, von einer Stelle mit der Ladung η ist, das Potential φ den Wert hat:

$$\varphi = \int \frac{\eta \mathrm{df}}{\mathrm{r}} \tag{11}$$

wobei die Integration zu erstrecken ist über alle Stellen, an denen $\eta \neq 0$ ist, d. h. **auch über die Stellen, an denen Influenzladungen sitzen.** Da diese nicht bekannt sind, erhellt ohne weiteres die Schwierigkeit des Problems. Würde man auch räumliche Ladungen zulassen — wir schließen sie aus — so müßte noch der Summand $\int \frac{\varrho \, \mathrm{d}\tau}{\mathrm{r}}$ hinzugefügt werden, wobei $\mathrm{d}\tau$ ein Volumenelement des Raumes darstellt, und die Integration über alle Stellen räumlicher Ladungen (inklusive der räumlicher Influenzladungen) zu erstrecken ist. Dann hat man allgemeiner:

$$\varphi = \int \frac{\varrho \, \mathrm{d}\tau}{\mathrm{r}} + \int \frac{\eta \mathrm{df}}{\mathrm{r}} \tag{11a}$$

1c) **Anwendungen: Elektrophor, Influenzmaschine.** Von den zahlreichen Anwendungen der Influenzelektrizität ist bereits in Abschnitt 1a die Möglichkeit besprochen worden, Leiter durch Influenz zu laden. Hier sollen nur zwei experimentell wichtige Fälle besprochen werden: der **Elektrophor** und die **Influenzmaschine.**

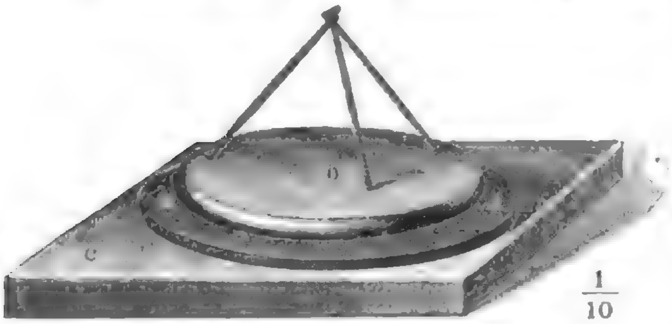


Fig. 6.

Der Elektrophor (Fig. 6) besteht aus einer isolierenden Platte a (dem sogenannten „Kuchen"), die auf einer Metallunterlage c ruht, und dem Metalldeckel b, der mittels dreier isolierender Schnüre abgehoben werden kann. Die schematische Figur 7 soll den Vorgang erläutern.

Der Kuchen, der etwa aus Schellack besteht, wird mittels eines Reibzeuges gerieben und nimmt negative Ladung an. Sich selbst überlassen, würde er diese bald verlieren, z. B. durch die Ionisation der Luft und die nie zu vermeidende Spitzenwirkung. Dem wirkt die Metallunterlage c entgegen, indem positive Elektrizität durch die Negative des Kuchens gebunden wird; die negative Influenzladung der Unterlage c wird zur Erde abgeleitet. Es bleibt also die Unterlage positiv geladen zurück und bindet die negative Ladung des Kuchens, so daß der Elektrophor, einmal erregt, seine Ladung auf Monate konserviert, woher der Name stammt. Man kann diese Ladung auf folgende Weise nutzbar machen: Der Deckel b wird aufgesetzt und es werden dann in ihm ebenfalls durch Influenz die Elektrizitäten getrennt, wie Figur 7 andeutet. Wird der aufgesetzte Deckel mit der Hand berührt, wodurch Verbindung mit der Erde hergestellt wird, so wird die negative Ladung abgeleitet; die positive Influenzladung wird durch die negative des Kuchens gebunden und kann bei aufgesetztem Deckel nicht abgeleitet werden. Hebt man jetzt den Deckel ab, so wird diese positive Ladung frei und kann beliebig verwendet werden. Die folgende Bemerkung zeigt, daß dieser Vorgang mit dem Energieprinzip verträglich ist. Der anfangs ungeladene Deckel b erhält durch die obigen Manipulationen potentielle elektrische Energie. Diese stammt daher, daß beim Abheben gegen die elektrische Anziehung der negativen Ladung des Kuchens und der positiven des Deckels Arbeit geleistet werden muß, die zu der gegen die Schwerkraft zu leistenden Arbeit hinzutritt.

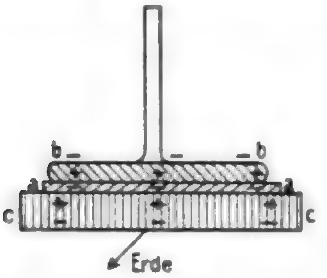


Fig. 7.

Sehr viel größere Ladungen liefert die 1865 von **Holtz** konstruierte Influenzmaschine, deren Wirkungsweise gewissermaßen einen kontinuierlich wirkenden Elektrophor darstellt. Wir folgen hier wörtlich der Darstellung von **Kaufmann** (Müller-Pouillet, Lehrbuch der Physik Bd. IV, 10. Aufl.), Figur 8 ist ein schematisches Modell der Influenzmaschine.

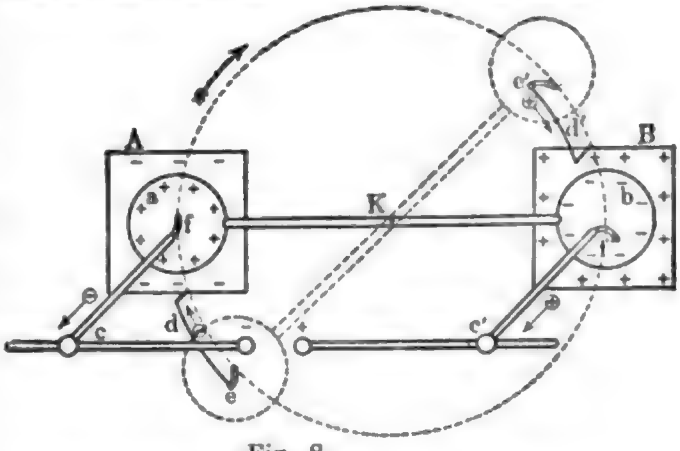


Fig. 8.

Digitized by Google

Es sei A eine leitende isolierte Scheibe, die auf irgendeine Weise negativ elektrisch geladen sei. Zwei Metallscheiben a und b seien durch eine isolierende Stange so mit einer Achse verbunden, daß sie sich in geringem Abstande vor A vorbei bewegen. Endlich seien noch zwei Leiter c und c′ vorhanden, die an der einen Seite je eine verschiebbare Stange tragen, die in eine Kugel endigt, an der anderen Seite je eine Schleiffeder f und f[1], die von den Scheiben a und b bei ihrer Umdrehung berührt werden. Wenn a sich vor A befindet, so wird es durch Influenz geladen, während die abgestoßene negative Elektrizität durch f auf c überfließt. Es entspricht also A dem Kuchen, a dem Deckel eines Elektrophors, f dem ableitenden Finger, nur wird jetzt die abgestoßene Influenzelektrizität nicht wie beim Elektrophor zur Erde abgeleitet, sondern auf dem Leiter c angesammelt. Dreht man jetzt die Achse um 180° in der Richtung des Pfeiles, so kommt a an die Stelle von b und gibt einen Teil seiner Ladung an C′ ab. Unterdessen ist b an die Stelle von a gelangt, wird dort ebenso wie vorher a influenziert und verstärkt noch die Ladung von c. Beim weiteren Drehen werden also nach jeder halben Umdrehung die Ladungen von c und c, sich um einen gewissen Betrag erhöhen, so lange bis die auf c angesammelten Ladungen die Wirkung von A gerade aufheben; rückt man aber die kugelförmigen Enden von c und c′ genügend nahe aneinander, so geht, schon ehe dieser Grenzwert erreicht wird, ein Funke zwischen den beiden Konduktoren über, der die angesammelten Ladungen ausgleicht, und das Spiel beginnt von neuem.

Die Wirkung läßt sich verdoppeln, wenn man der Scheibe A gegenüber eine zweite, B, aufstellt, der man eine positive Ladung gibt. Infolge der unvermeidlichen Verluste durch die isolierenden Stützen, sowie durch Ausströmen in die Luft, würden A und B ihre Ladung sehr bald verlieren, wenn man nicht für fortwährenden Ersatz sorgte. Dies kann ganz automatisch durch zwei Leiter d und d′ mit den Schleiffedern e und e′ geschehen. Durch diese geben die Leiter a und b, kurz bevor sie die A und B erreichen, einen Teil ihrer Ladungen an A und B ab, so daß diese einen konstanten Ladungszustand behalten; die Anbringung der Leiter d′ und e′ macht es überflüssig, die Scheibe B im Beginn besonders zu laden, da sie sich ja allmählich von selbst aufladet. — Da a und b im oberen Teile ihrer Bahn von A angezogen, von B abgestoßen, im unteren Teile dagegen von B angezogen, von A abgestoßen werden, so ist bei der Umdrehung zur Ueberwindung dieser Kräfte eine Arbeit aufzuwenden, die um so größer ist, je kräftiger die Maschine wirkt.

Gehen wir nun von dem beschriebenen schematischen Modell zu den wirklich ausgeführten. Maschinen über, so unterscheiden sich diese zunächst dadurch von dem Modell, daß ihre Wirkung eine kontinuierlichere ist. Die ältere von **Holtz** angegebene Maschine hat als rotierenden Teil keine Metallkörper, wie oben angenommen, sondern eine lackierte Glasscheibe, und statt der Schleiffedern Spitzenkämme. Die festen Leiter A und B

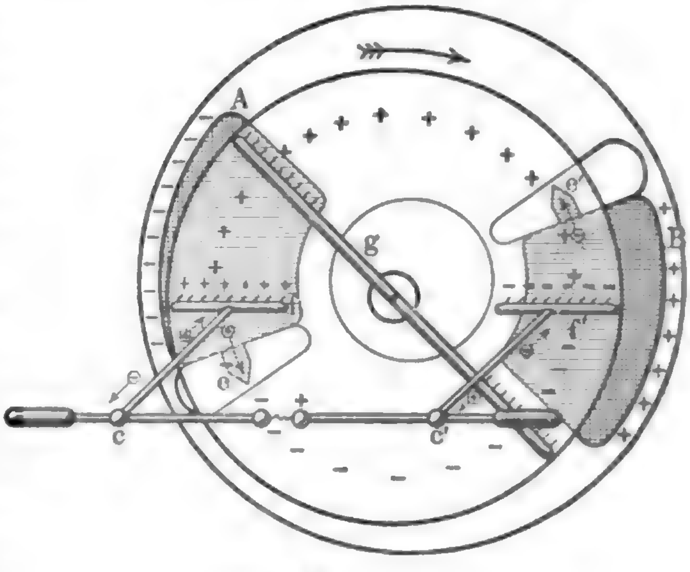


Fig. 9.

(Fig. 9) bestehen aus Papierscheiben, die auf eine feststehende, ebenfalls lackierte Glasplatte aufgeklebt sind. Ihre Wirkungsweise ist demnach folgende: Der Belegung A sei eine negative Anfangsladung mitgeteilt, die Leiter c c′ mögen sich berühren. Die Ladung von A wirkt influenzierend auf das Leitersystem c c′, so daß die + Elektrizität c durch die Spitzen f auf die bewegliche Scheibe ausströmt und von dieser bei ihrer Umdrehung mitgenommen wird. Die + Elektrizität wirkt influenzierend auf die Bewegung B, so daß negative Elektrizität aus der Pappspitze e′ auf die rotierende Scheibe strömt (die Spitzen e und e′ ragen durch zwei Ausschnitte der festen Scheibe bis dicht an die Rückseite der beweglichen). Die somit positiv geladene Belegung B treibt die positive Ladung der beweglichen Scheibe durch c c′ wieder nach f hin, nicht dagegen die von A abgestoßene negative Ladung durch die Spitzen f′ auf die Scheibe. Die negative Ladung der Scheibe wiederum gelangt durch die weitere Drehung wieder nach links, zieht negative Elektrizität aus der Spitze e zur Rückseite der Scheibe, dadurch die negative Ladung von A verstärkend und die vorher aus e′ auf die Rückseite gelangte negative Elektrizität neutralisierend, oder in positive Elektrizität verwandelnd. Schließlich wird die negative Ladung der Scheibe durch die aus f ausströmende posi-

Digitized by Google

tive Elektrizität neutralisiert und in eine positive Ladung umgewandelt. Es genügt also zum Ingangsetzen der Maschine eine kleine Anfangsladung einer der beiden Belegungen A oder B, die nur so stark sein muß, daß die Grenzdichte für beginnende Spitzenwirkung erreicht ist. Die Maschine verstärkt dann bei ihrer Umdrehung die kleinen Anfangsladungen bis zu einem Maximum. Man braucht sogar die Anfangsladung nicht einmal der Belegung wirklich mitzuteilen, es genügt auch die Influenzwirkung einer kräftig geriebenen Hartgummischeibe (Elektrophorkuchen), die man A nähert. Dann wirkt zu Anfang die Hartgummischeibe verteilend auf den Spitzenkamm f; wenn nach mehreren Umdrehungen die Belegungen A und B eine genügende Ladung angehäuft haben, kann man die Hartgummischeibe entfernen. Auf der Figur sieht man außer den Leitern c c' noch einen schräg stehenden Leiter g. Die Bedeutung dieses „Diagonalkonduktors" ist folgende: Wenn man die Leiter c c' über eine gewisse Entfernung auseinanderzieht, so können die Funken das Intervall nicht mehr überspringen und die Wirkung der Maschine hört völlig auf, da die Belegungen infolge mangelnder Zufuhr ihre Ladung bald verlieren. Dieser Uebelstand wird durch die Anbringung des Diagonalkonduktors vermieden, indem dieser bei zu großer Entfernung von c und c' sofort deren Rolle übernimmt und die Wirkung aufrecht erhält.

1d) Lösung spezieller Fälle: Platten- und Kugelkondensator. In gewissen einfachen Fällen läßt sich die Theorie durchführen. Der einfachste ist der des Plattenkondensators. Zwei sehr große Platten von der Fläche S stehen sich in dem kleinen Abstande d gegenüber; die erste habe die positive Ladung e, so daß die Flächendichte der ersten Platte $\eta_1 = e/S$ ist. Die andere sei zunächst unelektrisch (Fig. 10). Auf letzterer

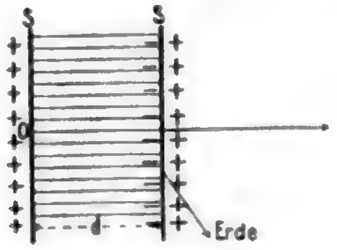


Fig. 10.

wird aber durch Influenz Elektrizität in der aus Figur 10 hervorgehenden Weise erzeugt; leitet man die zweite Platte zur Erde ab, so erhält sie eine negative Ladung, deren Größe zu bestimmen ist. Die Kraftlinien verlaufen alle parallel, ihre Richtung nehmen wir als x-Achse. Man erkennt leicht, da alle von der ersten Platte ausgehenden Kraftlinien auf der zweiten endigen, daß auf der letzteren die influenzierte Ladung von derselben Größe, aber von entgegengesetztem Vorzeichen ist, wie auf der ersten; also $\eta_2 = -\eta_1 = -e/S$. Die elektrische Kraft $\mathfrak{E}$ (oder, da sie parallel der x-Achse ist, $\mathfrak{E}_x$) ist leicht anzugeben. Denn nach der Definition des Potentials ist die Kraft gleich dem Potentialgefälle zwischen zwei Niveauflächen dividiert durch den Abstand derselben. Hier sind die beiden Platten des Kondensators Niveauflächen; die erste habe das Potential φ_1; das Potential φ_2 der zweiten, die zur Erde abgeleitet ist, ist gleich Null. Also ist das Potentialgefälle zwischen beiden Platten $\varphi_1 - \varphi_2 = \varphi_1$, und folglich die elektrische Kraft

(12) $$\mathfrak{E}_x = \frac{\varphi_1}{d} = \text{Const},$$

da φ_1 selbst eine Konstante ist. Das hätte man natürlich auch aus der Betrachtung der Kraftlinien finden können, da sie äquidistant und parallel verlaufen, weil jede Flächeneinheit der Platten mit derselben Ladung η_1 versehen ist. Die Ausführung der Rechnung ergibt folgenden Wert für die konstante elektrische Kraft:

(13) $$\mathfrak{E}_x = \frac{4\pi e}{S};$$

denn die Gesamtladung ist ja e, also die Zahl der nach Faradays Vorschrift konstruierten Kraftlinien pro $cm^2 = \frac{4\pi e}{S}$; das ist aber die Größe der Feldstärke und daraus folgt in Verbindung mit Gleichung (2), daß das Potential der ersten Platte

(14) $$\varphi_1 = \frac{4\pi d}{S} \cdot e$$

ist.

Da auf jedem Konduktor das Potential konstant ist, so ist auch das Verhältnis der auf ihm sitzenden Ladung zum Potential eine Konstante, die man die Kapazität C desselben nennt. Das gibt in unserem Falle:

(15) $$C = \frac{e}{\varphi_1} = \frac{S}{4\pi d}.$$

Das heißt: die Kapazität ist proportional der Fläche und umgekehrt proportional dem Abstande der beiden Platten.

Dieses Resultat ist von Bedeutung für die experimentelle Elektrizitätslehre. Denn da nach Definition der Kapazität (Gleichung (15) das Potential eines Konduktors $\varphi_1 = \frac{e}{C}$ ist, so ist das Potential desselben bei gleicher elektrischer Ladung um so kleiner, je größer seine Kapazität ist. Nun kann ein Konduktor, der von einem Isolator umgeben ist, nur bis zu einem gewissen

Digitized by Google

Potentiale aufgeladen werden; wird dieses Grenzpotential überschritten, so entlädt sich derselbe ganz oder teilweise (z. B. unter Funkenbildung) durch den Isolator hindurch. Es ist also wichtig, bei großen Elektrizitätsmengen niedrige Potentiale zu haben, und das kann eben durch Vergrößerung der Kapazität geschehen. Das ist die Bdeeutung der Leydener Flaschen und aller auf demselben Prinzip beruhenden Anordnungen, der sogenannten „Ansammlungsapparate“ oder „Kondensatoren“. Bei den meisten dient allerdings als Isolator nicht das Vakuum, sondern ein anderes Dielektrikum, z. B. Glas oder Hartgummi. Dadurch wird die kapazitätsvergrößernde Wirkung, wie in Abschnitt 2 b auseinandergesetzt werden wird, noch erhöht.

Ganz analog läßt sich die Theorie des Kugelkondensators entwickeln, bei dem eine innere Kugel vom Radius R_1, die die positive Ladung e trage, von einer äußeren mit dem Radius R_2 umhüllt wird, die etwa zur Erde abgeleitet sei (Fig. 11). Die Elektrizitätsverteilung und den Kraftlinienverlauf sieht man aus Figur 11, deren Konstruktion schon aus Symmetriegründen folgt.

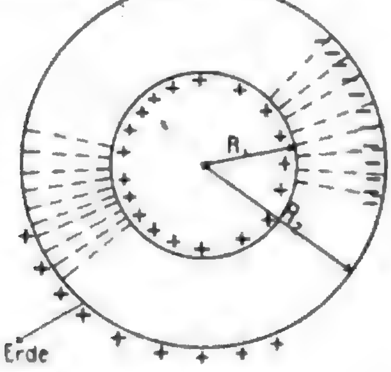


Fig. 11.

Die ganz analog durchführbare Theorie ergibt für die Kapazität eines Kugelkondensators:

$$(16) \qquad C = \frac{R_1 R_2}{R_2 - R_1} = \frac{R_1 R_2}{d},$$

wenn d der senkrechte Abstand beider Kugelflächen ist. Ebenso folgt für Komponenten der elektrischen Kraft im Abstande r vom Kugelzentrum:

$$(17) \qquad \mathfrak{E}_x = \frac{ex}{r^3}; \mathfrak{E}_y = \frac{ey}{r^3}; \mathfrak{E}_z = \frac{ez}{r^3}.$$

Also ist die Gesamtkraft: $\mathfrak{E} = \frac{e}{r^2}$, d. h. genau so, als wenn die Ladung e im Kugelmittelpunkt konzentriert wäre, was man auch aus Figur 11 unmittelbar durch Anschauung hätte entnehmen können.

Es ist interessant, den Spezialfall zu betrachten, daß überhaupt nur die innere Kugel vorhanden ist, was man analytisch dadurch erreichen kann, daß man den Radius R_2 und damit den Abstand d der beiden Kugelflächen unendlich groß werden, d. h. die äußere Kugel ins Unendliche rücken läßt. Dann ergibt die letzte Formel für die Kapazität einer einzelnen Kugel:

$$(18) \qquad C = R_1.$$

Man erkennt daraus, daß die Kapazität von der Dimension einer Länge und ihrem numerischen Werte nach gleich dem Kugelradius ist. An diesem speziellen Beispiele erkennt man deutlich, daß die Kapazität eines Konduktors streng genommen abhängig ist von dem elektrischen Zustande seiner gesamten Umgebung. Das macht sich besonders bemerkbar im Falle des Zylinderkondensators, dessen Theorie ganz ähnlich zu entwickeln ist, auf die aber hier nicht eingegangen werden kann. Dies ist für die Praxis wichtig, da ein ins Meer gelegtes Kabel einen ungeheuren Zylinderkondensator darstellt, mit dem stromführenden Draht als innerer, dem leitenden Meerwasser als äußerer Belegung.

1 e) Methode der elektrischen Bilder. William Thomson (Lord Kelvin) hat eine Methode ersonnen zur Lösung des oben formulierten elektrostatischen Problems, deren Wesen an einem einfachen Falle klargemacht werden soll. Wir denken uns zwei gleiche Ladungen e im Abstand 2a voneinander angebracht (Fig. 12). Es ist natürlich leicht, da die Ladungen fest gegeben sind, die Kraftlinien (gestrichelt) und die Niveauflächen (ausgezogen) zu konstruieren, wie sie Figur 12 zeigt.

Man erkennt sofort, daß die zwischen beiden Ladungen liegende Mittelebene EE Symmetrieebene ist und mit der Niveaufläche des Potentials Null zusammenfällt. Man kann also EE durch eine Metallwand ersetzen, die zur Erde abgeleitet ist, ohne daß irgend etwas an der Kraftlinien- und Niveauflächenverteilung geändert wird. Beschränken wir unsere Betrachtung etwa auf die linke Seite, so haben wir das Problem der elektrischen Verteilung für den Fall gelöst, daß eine Ladung +e im Abstande a von einer ∞ großen, leitenden Wand sich befindet. Diese Verteilung ist dieselbe, wie sie durch eine im Abstande a hinter der Wand befindliche negative Ladung hervorgebracht wurde. Wir haben also für unser Problem das Bild der Figur 13. Man bezeichnet die fingierte Ladung —e hinter der Wand als das „elektrische Bild“ der wirklich vorhandenen Ladung + e vor der Wand, und davon hat die ganze Methode, die darin besteht, die eingebetteten Leiter durch fingierte Ladungen zu ersetzen, ihren

Digitized by Google

Namen empfangen. Lord Kelvin hat die Methode namentlich auf kugelförmige Leiter ausgedehnt, worauf hier nicht weiter eingegangen werden kann.

Ladungen einschließlich der Influenzladungen sich auf Leiteroberflächen befinden sollten, die selbst ins Vakuum gebettet waren. Nunmehr wollen wir annehmen, daß wir ein be-

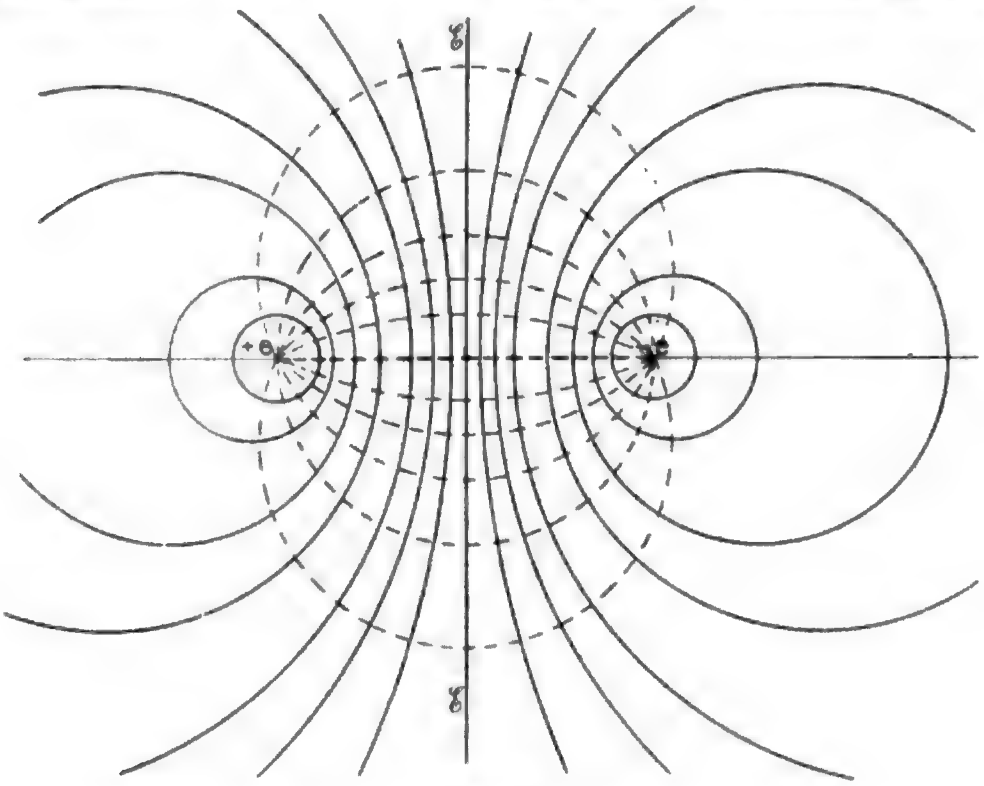


Fig. 12.

2. Leiter im elektrischen Felde im homogenen Dielektrikum. 2a) Einfluß des Mediums auf die Erscheinung. Bisher hatten wir vorausgesetzt, daß alle

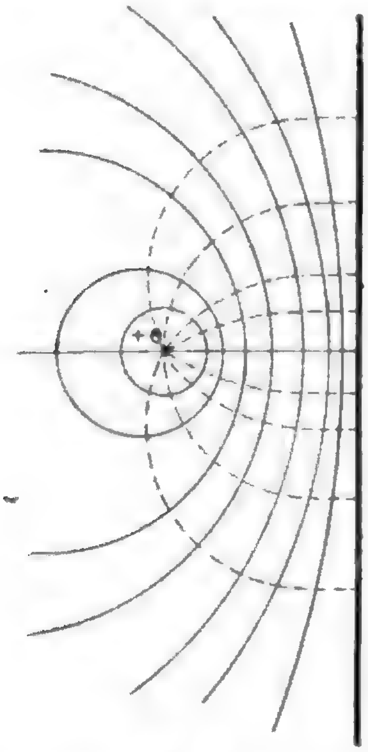


Fig. 13.

liebiges isolierendes homogenes Medium haben (fest, flüssig oder gasförmig), in dem der ganze Vorgang sich abspielt. Dann treten Veränderungen auf, die wir jetzt besprechen müssen.

Wir gehen von folgender, durch Faraday festgestellten Erfahrungstatsache aus: während die Kraft $\mathfrak{K}^0$ zwischen zwei Ladungen e_1 und e in der Entfernung r im Vakuum den Wert hat

$$\mathfrak{K}^0 = \frac{e_1 e}{r^2},$$

gilt dieses Gesetz nicht mehr, wenn die Ladungen sich in einem anderen isolierenden Medium befinden. Dann tritt an dessen Stelle die Gleichung:

$$\mathfrak{K} = \frac{1}{\varepsilon}\frac{e_1 e}{r^2} \qquad (19)$$

wo ε eine Materialkonstante ist, die größer als 1 ist. Der Fall des Vakuums ist daher ein durch $\varepsilon = 1$ ausgezeichneter Spezialfall. Diese Materialkonstante charakterisiert nach der Maxwellschen Theorie das elektrische Verhalten des Isolators in ähnlicher Weise, wie die Elastizitätskonstante eines Stoffes seine elastischen Eigenschaften bestimmt. Man nennt sie die Dielektrizitätskonstante (D.K.) und bezeichnet daher auch den Isolator als ein Dielektrikum. Als elektrische Kraft bezeichnen wir bekanntlich die Kraft pro

Digitized by Google

Einheitsladung, also den Wert $\frac{\mathfrak{K}^0}{e}$ resp. $\frac{\mathfrak{K}}{e}$. Fürs Vakuum gilt also:

$$\frac{\mathfrak{K}^0}{e} = \frac{e_1}{r^2} = \mathfrak{E}^0$$

und für unser beliebiges Medium von der D.K. ε gilt nach (19):

$$(20) \qquad \mathfrak{E} = \frac{\mathfrak{K}}{e} = \frac{1}{\varepsilon}\frac{e}{r^2} = \frac{e}{\varepsilon}\cdot\frac{1}{r^2}.$$

Man kann also — und das ist eigentlich schon die Lösung des vorliegenden Problems — sich die Sache so vorstellen, als ob statt des Wertes e die Ladung $\frac{e}{\varepsilon}$ vorhanden wäre. Denkt man sich die Ladungen $\frac{e}{\varepsilon}$ an Stelle der wirklich vorhandenen Ladungen e substituiert, so kann man alles so behandeln wie im Vakuum. Die Größen $\frac{e}{\varepsilon}$, die hier zum ersten Male auftreten, nennt man „freie Ladungen", zum Unterschiede von den „wahren Ladungen" e. Der hier skizzierte Standpunkt ist derjenige, mit dem die sogenannte Fernewirkungstheorie an die Erscheinungen der Elektrostatik in einem Isolator herantritt. Etwas anders formuliert, aber natürlich zu denselben Konsequenzen führend, ist die Ausdrucksweise der Faraday-Maxwellschen Nahewirkungstheorie. Diese geht aus von Gleichung (20), indem sie sich darauf stützt, daß nach dieser Gleichung der Ausdruck $\varepsilon\mathfrak{E}$ dieselbe Rolle spielt, wie früher im Vakuum der Vektor $\mathfrak{E}$ selbst. Diesen neuen Vektor $\varepsilon\mathfrak{E}$ nennt man „dielektrische Verschiebung" und bezeichnet ihn durch den Buchstaben $\mathfrak{D}$; also:

$$(21) \qquad \mathfrak{D} = \varepsilon\mathfrak{E}.$$

Man kann nun, um den Zustand des Feldes zu charakterisieren, genau wie im Vakuum gewisse Kurven ziehen: an Stelle der Kraftlinien, d. h. der Linien, welche die Richtung des Vektors $\mathfrak{E}$ angeben, treten die sogenannten Verschiebungslinien, oder $\mathfrak{D}$-Linien. Diese sind es, welche in den positiven wahren Ladungen entspringen und an den negativen endigen. Sie sind, da $\mathfrak{D} > \mathfrak{E}$ ist, von gleicher Richtung wie die Kraftlinien, aber von anderer Zahl. Denn nach (21) kommt auf ε $\mathfrak{D}$-Linien erst eine $\mathfrak{E}$-Linie; aus der Elektrizitätsmenge e entspringen $4\pi e$ $\mathfrak{D}$-Linien, aber nur $\frac{4\pi e}{\varepsilon}$ Kraft-($\mathfrak{E}$-) Linien. Im Vakuum werden beide identisch.

Analytisch läßt sich dies folgendermaßen ausdrücken: Da die elektrische Kraft ein Potential hat, so bleiben die Gleichungen (1) bestehen:

$$(22) \qquad \frac{\partial\mathfrak{E}_x}{\partial y} - \frac{\partial\mathfrak{E}_y}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial\mathfrak{E}_y}{\partial z} - \frac{\partial\mathfrak{E}_z}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial\mathfrak{E}_z}{\partial x} - \frac{\partial\mathfrak{E}_x}{\partial z} = 0$$

und an Stelle der Gleichungen (2) bis (5) treten analoge, nur daß nach obigem an Stelle von $\mathfrak{E}$ der Vektor $\mathfrak{D}$ tritt; also:

$$(23) \qquad \int \mathfrak{D}_n df_i = 4\pi\Sigma e_i$$

$$(24) \qquad \begin{cases} a) \ \frac{\partial\mathfrak{D}_x}{\partial x} + \frac{\partial\mathfrak{D}_y}{\partial y} + \frac{\partial\mathfrak{D}_z}{\partial z} = 0 \\ b) \ \mathfrak{D}_n = 4\pi\eta \text{ (an Leiteroberflächen)} \\ c) \ \mathfrak{D} = 0 \text{ (im Innern der Leiter).} \end{cases}$$

Ersetzt man in diesen Gleichungen $\mathfrak{D}$ durch $\varepsilon\mathfrak{E}$, wo ε eine Konstante ist, so erhält man der Reihe nach:

$$(25) \qquad \int \mathfrak{E}_n df_i = 4\pi\Sigma\frac{e_i}{\varepsilon}$$

$$(26) \qquad \begin{cases} a) \ \frac{\partial\mathfrak{E}_x}{\partial x} + \frac{\partial\mathfrak{E}_y}{\partial y} + \frac{\partial\mathfrak{E}_z}{\partial z} = 0 \\ b) \ \mathfrak{E}_n = 4\pi\eta/\varepsilon \text{ (an Leiteroberflächen)} \end{cases}$$

$$(27) \qquad \mathfrak{E} = 0 \text{ (im Innern von Leitern).}$$

Diese Gleichungen zeigen deutlich — und das ist die Brücke zu dem oben entwickelten Standpunkte der Fernewirkungstheorie —, daß hier die elektrischen Kräfte sich aus den freien Ladungen $\frac{e}{\varepsilon}$ statt aus den wahren Ladungen e berechnen. Führt man noch den Begriff des Potentiales ein, so hat man an Stelle von (22), (26) und (27):

$$(28) \qquad \mathfrak{E}_x = -\frac{\partial\varphi}{dx}, \quad \mathfrak{E}_y = -\frac{\partial\varphi}{dy}, \quad \mathfrak{E}_z = -\frac{\partial\varphi}{\partial z}$$

[entspricht Gleichung 22].

$$(29) \qquad \frac{\partial^2\varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\varphi}{dy^2} + \frac{\partial^2\varphi}{\partial z^2} = 0$$

[entspricht Gleichung 26a].

$$(30) \qquad \frac{\partial\varphi}{-\partial n} = -\frac{4\pi\eta}{\varepsilon}$$

[entspricht Gleichung 26b].

$$(31) \qquad \varphi = \varphi_i = \text{Const.}$$

[entspricht Gleichung 27].

Die obigen Gleichungsquadrupel (22) bis (27) oder (28) bis (31) bestimmen das elektrische Feld im homogenen Dielektrikum vollständig, was an einigen Beispielen gezeigt werden soll.

2b) Lösung spezieller Probleme. Als Beispiel wählen wir den Fall des Plattenkondensators, dessen Zwischenraum jetzt von einem Medium der D.K. ε ausgefüllt sei. Nach den obigen Auseinandersetzungen bedürfen wir hier gar keiner Theorie mehr, sondern können die Gleichungen (13) und (14) hier übertragen, nur daß wir statt e den Wert $\frac{e}{\varepsilon}$, nämlich den der freien Ladungen benutzen. Also ergibt sich für die elektrische Kraft:

$$(32) \qquad \mathfrak{E}_x = \frac{4\pi e}{\varepsilon S},$$

für das Potential der ersten Platte:

Digitized by Google

(33) $\varphi_1 = 4\pi e d/\varepsilon S$

also für das Verhältnis zwischen Ladung und Potential, d. h. die Kapazität:

(34) $$C = \frac{e}{\varphi_1} = \frac{\varepsilon S}{4\pi d}$$

Man erkennt daher, daß die Kapazität gegen den Fall des Vakuums im Verhältnis $\varepsilon:1$ vergrößert worden ist. Das nämliche Resultat gilt für Kugel- und Zylinderkondensator. Daß bei den wirklichen Kondensatoren statt Luft Glas (D. K. $\simeq 6$) oder Hartgummi (D. K. ~ 3) benutzt wird, erhöht also die Kapazität beträchtlich.

Von Interesse ist es noch, den in Abschnitt 1 e behandelten Fall zu betrachten, wo eine Ladung $+e$ im Abstande a vor einer unendlichgroßen leitenden Ebene angebracht ist. Dasselbe Problem betrachten wir jetzt, nur daß jetzt die Ladung nicht im Vakuum, sondern in einem Medium von der D. K. ε sich befindet. Die Lösung ist sehr einfach, wenn man bedenkt, daß wir hier an Stelle der wahren die freie Ladung zu benutzen haben. Wir werden also an Stelle der Ladung $+e$ im Dielektrikum ε substituieren die Ladung $+\frac{e}{\varepsilon} = +e'$ im Vakuum; deren elektrisches Bild ist $-\frac{e}{\varepsilon} = -e'$ hinter der Wand im Abstande a, so daß jetzt nur noch ein elementares Problem vorliegt, nämlich das resultierende Feld zweier fest gegebenen Ladungen zu berechnen.

3. Inhomogenes Dielektrikum (Einbettung von Nichtleitern). 3a) Ableitung der Erscheinungen aus der Theorie der Elektrostatik. In diesem allgemeinsten Falle liegen die Verhältnisse natürlich entsprechend komplizierter. Wir haben ein von irgendwelchen Ladungen herrührendes Feld im inhomogenen Dielektrikum, in das Leiter eingebettet sind. Die Inhomogenitäten können entweder derart sein, daß die D.K. ε kontinuierlich variiert, oder daß sie sich an der Berührungsfläche verschiedener Körper sprungweise ändert.

Auch hier tritt wieder an Stelle von $\mathfrak{E}$ offenbar $\mathfrak{D}$, und an Stelle der Kraftlinien sind die Verschiebungslinien zu konstruieren. Aber die Sache liegt hier komplizierter wie früher insofern, als $\mathfrak{D}$ zwar noch $\mathfrak{E}$ proportional ist, aber der Proportionalitätsfaktor ε variiert jetzt im allgemeinen von Ort zu Ort; die Anzahl der ein Flächenstück durchsetzenden $\mathfrak{D}$-Linien steht zur Zahl der dasselbe Flächenstück durchsetzenden $\mathfrak{E}$-Linien an den verschiedenen Orten des Raumes nicht mehr in konstantem Verhältnis. Das bedingt, wie wir sehen werden, das Auftreten freier Ladungen an den sämtlichen Stellen, wo ε variiert. Nehmen wir zunächst den Fall an, wir hätten es mit einer Trennungsfläche S zweier Medien der D.K. ε_1 und ε_2 zu tun.

Auf der Trennungsfläche befinden sich keine wahren Ladungen; also ist, da die $\mathfrak{D}$-Linien nur in wahren Ladungen entspringen oder endigen, die Zahl der aus dem Medium ε_1 pro Flächeneinheit die Trennungsfläche S treffenden Linien gleich der Anzahl, die (hier nach der rechten Seite) ins zweite Medium ε_2 verläuft. Allerdings werden wir später sehen, daß die $\mathfrak{D}$-Linien in der Fläche S einen scharfen Knick erleiden, d. h. ähnlich wie die Lichtstrahlen gebrochen werden; aber links und rechts von der Trennungsfläche ist die Anzahl gleich. Ganz anders mit den $\mathfrak{E}$-Linien, die für die freie Ladung charakteristisch sind, da sie ja in den freien Ladungen entspringen und endigen. Links von der Fläche S ist die Anzahl der $\mathfrak{E}$-Linien offenbar $\mathfrak{E}_1 = \frac{\mathfrak{D}}{\varepsilon_1}$, rechts dagegen $\mathfrak{E}_2 = \frac{\mathfrak{D}}{\varepsilon_2}$, d. h. $\mathfrak{E}_1 \neq \mathfrak{E}_2$.

Es endigen oder entstehen in der Trennungsfläche $\mathfrak{E}$-Linien; dort treten also flächenhafte freie Ladungen auf, die man auch als „influenzierte" bezeichnen kann. Das ist das Neue, daß sie jetzt auch da auftreten, wo gar keine wahre Ladung vorhanden ist, während sich im vorigen Abschnitt (homogenes Medium) freie Ladungen nur dort fanden, wo auch wahre vorhanden waren.

Betrachten wir jetzt einen kleinen Würfel, innerhalb dessen ε stetig variiert; man kann sich diesen in unendlich viele, unendlich dünne Schichten zerlegt denken, innerhalb deren die D. K. sich sprungweise um unendlich wenig ändert. So erkennt man, daß innerhalb des Würfels ebenfalls $\mathfrak{E}$-Linien endigen oder entspringen, d. h. daß überall, wo ε stetig variiert, räumlich verteilte freie Ladungen auftreten.

Wir wollen jetzt diese qualitativen Betrachtungen etwas exakter formulieren. Nach der Faradayschen Vorschrift erhalten wir die Größe der dielektrischen Verschiebung an einer Stelle des Raumes, in dem wir dort senkrecht zur Richtung der $\mathfrak{D}$-Linien eine Flächeneinheit konstruieren und die Anzahl der $\mathfrak{D}$-Linien, die auf diese entfallen, zählen; liegt die Fläche nicht senkrecht zu $\mathfrak{D}$, so hat man die Normalkomponente $\mathfrak{D}_n$ zu bilden. In dem letzteren Falle befinden wir uns hier mit der Trennungsfläche S; die Normalkomponenten zu beiden Seiten sind respektive $\mathfrak{D}_{n1}$ und $\mathfrak{D}_{n2}$. Und da keine wahren Ladungen auf S sitzen sollen, so müssen die beiden Normalkomponenten der dielektrischen Verschiebung gleich sein, also:

Digitized by Google

(35) $\mathfrak{D}_{n_1} = \mathfrak{D}_{n_2}$,

oder, wenn man $\mathfrak{D} = \varepsilon \mathfrak{E}$ setzt:

(36) $\varepsilon_1 \mathfrak{E}_{n_1} = \varepsilon_2 \mathfrak{E}_{n_2}$,

Zu dieser Grenzbedingung tritt eine andere, die die tangentiellen Komponenten betrifft. Es existiert auch im inhomogenen Felde ein Potential der elektrischen Kraft, d. h. die Arbeit, die geleistet werden muß, um eine Einheitsladung von einer Stelle (1) des Raumes an eine Stelle (2) desselben zu verschieben, hängt nur von der Lage der Punkte (1) und (2) ab, nicht dagegen von dem Wege, auf dem man von (1) nach (2) gelangt ist.

Fig. 14a.

Es sei nun in Figur 14a S wieder die Trennungsfläche der beiden Medien, auf der zwei Punkte (1) und (2) markiert seien. Wir wollen die Einheitsladung einmal im Medium ε_1 auf einem Wege a von der Länge s, der sich der Trennungsfläche S anschmiegt, von (1) nach (2) führen, das zweitemal auf dem Wege b, der im Medium ε_2 längs der Trennungsfläche verläuft. Nennen wir die hier allein in Betracht kommenden tangentiellen Komponenten der elektrischen Kraft $\mathfrak{E}_{t_1}$ und $\mathfrak{E}_{t_2}$, so muß nach obigem die auf beiden Wegen geleistete Arbeit gleich sein; also

$$\mathfrak{E}_{t_1} . s = \mathfrak{E}_{t_2} . s,$$

oder

(37) $\mathfrak{E}_{t_1} = \mathfrak{E}_{t_2}$

Diese Grenzbedingungen bewirken es, daß in der Trennungsfläche eine Brechung der $\mathfrak{E}$- und $\mathfrak{D}$-Linien eintritt; zur Ableitung des Brechungsgesetzes gehen wir jetzt über.

Es stelle S in Figur 14b wieder die Trennungsfläche dar; ferner die Strecken $\mathfrak{E}_1$ und $\mathfrak{E}_2$ der Größe und Richtung nach die elektrische Kraft in beiden Medien an der Trennungsfläche; hh sei das Einfallslot, und α_1 resp. α_2 „Einfallswinkel" und „Brechungswinkel". Bilden wir jetzt die Projektion von $\mathfrak{E}_1$ und $\mathfrak{E}_2$ auf die Trennungsfläche ($\mathfrak{E}_{t_1}$ resp. $\mathfrak{E}_{t_2}$) und auf das Einfallslot ($\mathfrak{E}_{n_1}$ und $\mathfrak{E}_{n_2}$), so ersieht man folgendes:

$$\frac{\mathfrak{E}_{t_1}}{\mathfrak{E}_{n_1}} = \text{tang}\ \alpha_1; \quad \frac{\mathfrak{E}_{t_2}}{\mathfrak{E}_{n_2}} = \text{tang}\ \alpha_2.$$

Setzt man in der zweiten dieser Gleichungen nach (36) $E_{t_1} = \mathfrak{E}_{t_2}$ und nach (35) $\mathfrak{E}_{n_2} = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \mathfrak{E}_{n_1}$, so erhält man:

$$\text{tang}\ \alpha_1 = \frac{\mathfrak{E}_{t_1}}{\mathfrak{E}_{t_2}}; \quad \text{tang}\ \alpha_2 = \frac{\mathfrak{E}_{t_1}}{\mathfrak{E}_{t_1}} \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1};$$

also folgt schließlich das Brechungsgesetz (das ebenso für die $\mathfrak{D}$-Linien gilt):

(38) $$\frac{\text{tang}\ \alpha_1}{\text{tang}\ \alpha_2} = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}.$$

Da die trigonometrische Tangente eines Winkels zwischen 0 und π zwischen 0 und $+\infty$ variiert, ist ein analoges Phänomen wie das der Totalreflexion in der Optik ausgeschlossen. Was die übrigen Folgerungen

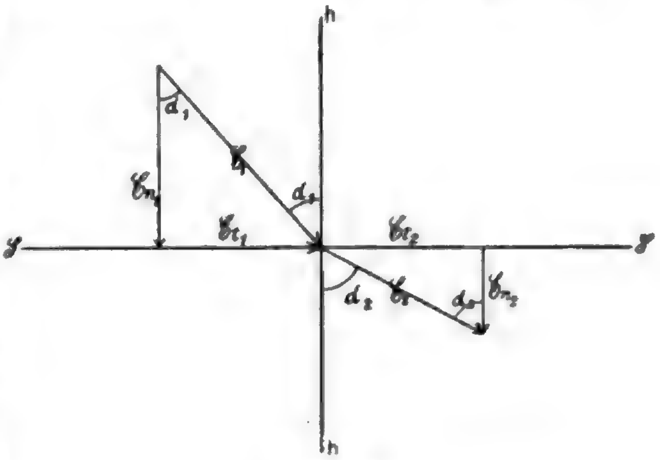


Fig. 14b.

aus (37) angeht, so sei auf die Diskussion in dem Artikel „**Magnetische Influenz**", Abschnitt 2c verwiesen. Sie sind genau dieselben, da auch für die magnetischen Kraftlinien formal dasselbe Brechungsgesetz gilt.

Rein analytisch stellt sich die Theorie folgendermaßen dar:

Da auch hier durch Herumführen einer elektrischen Ladung auf geschlossener Kurve keine Arbeit gewonnen werden kann, so bestehen die Gleichungen (23) auch hier:

(38a) $$\left\{\begin{aligned} \frac{\partial \mathfrak{E}_z}{\partial y} - \frac{\partial \mathfrak{E}_y}{\partial z} &= 0 \\ \frac{\partial \mathfrak{E}_x}{\partial z} - \frac{\partial \mathfrak{E}_z}{\partial x} &= 0 \\ \frac{\partial \mathfrak{E}_y}{\partial x} - \frac{\partial \mathfrak{E}_x}{\partial y} &= 0 \end{aligned}\right.$$

Im übrigen tritt, wie vorher auseinandergesetzt, an Stelle des Vektors $\mathfrak{E}$ der Verschiebungsvektor $\mathfrak{D}$, so daß wir analog Gleichung (24) haben:

(38b) $$\int \mathfrak{D}_n df_i = 4\pi e_i,$$

wobei:

(38c) $\mathfrak{D} = \varepsilon \mathfrak{E}$ ist.

Es ist aber wohl zu beachten, daß im folgenden ε nicht als Konstante, sondern als Funktion der Raumkoordinaten x y z zu betrachten ist, da das

Digitized by Google

Medium in seinen Eigenschaften als variabel vorausgesetzt ist. Aus (35) folgt, da räumliche Ladungen wieder ausgeschlossen werden, analog (25):

$$(38d)\qquad \frac{\partial \mathfrak{D}_x}{\partial x} + \frac{\partial \mathfrak{D}_y}{\partial y} + \frac{\partial \mathfrak{D}_z}{\partial z} = 0$$

und für Oberflächenladungen, die auch hier nur auf Leitern angenommen werden sollen:

$$(38e)\qquad \begin{cases} \mathfrak{D}_n = 4\pi\eta, & \text{oder} \\ \mathfrak{E}_n = \dfrac{4\pi\eta}{\varepsilon} \end{cases}$$

Im Innern der Leiter endlich ist, wie immer, das elektrische Feld gleich Null, also:

$$(38f)\qquad \mathfrak{E} = 0 \text{ (im Innern von Leitern).}$$

Wir wollen die Konsequenzen dieser Gleichung untersuchen: (38a) spricht aus, daß die elektrische Kraft $\mathfrak{E}$ aus einem Potential φ ableitbar ist, d. h. daß wie früher:

$$(39)\qquad \mathfrak{E}_x = -\frac{\partial\varphi}{\partial x},\ \mathfrak{E}_y = -\frac{\partial\varphi}{\partial y},\ \mathfrak{E}_z = -\frac{\partial\varphi}{\partial z} \text{ ist.}$$

Gleichung (38d) wollen wir derartig weiter behandeln, daß wir für $\mathfrak{D}$ den Wert $\varepsilon\mathfrak{E}$ schreiben, wobei ε als Funktion von xyz zu behandeln ist. Dann folgt:

$$(40)\qquad \varepsilon\left(\frac{\partial \mathfrak{E}_x}{\partial x} + \frac{\partial \mathfrak{E}_y}{\partial y} + \frac{\partial \mathfrak{E}_z}{\partial z}\right) + \mathfrak{E}_x \frac{\partial\varepsilon}{\partial x} + \mathfrak{E}_y \frac{\partial\varepsilon}{\partial y} + \mathfrak{E}_z \frac{\partial\varepsilon}{\partial z} = 0.$$

Rechnet man den Ausdruck

$$\frac{\partial \mathfrak{E}_x}{\partial x} + \frac{\partial \mathfrak{E}_y}{\partial y} + \frac{\partial \mathfrak{E}_z}{\partial z}$$

aus, so folgt dafür:

$$(41)\qquad \frac{\partial \mathfrak{E}_x}{\partial x} + \frac{\partial \mathfrak{E}_y}{\partial y} + \frac{\partial \mathfrak{E}_z}{\partial z} = -\frac{\mathfrak{E}_x \frac{\partial\varepsilon}{\partial x} + \mathfrak{E}_y \frac{\partial\varepsilon}{\partial y} + \mathfrak{E}_z \frac{\partial\varepsilon}{\partial z}}{\varepsilon} = 4\pi\varrho'.$$

Da hier der Ausdruck $\frac{\partial \mathfrak{E}_x}{\partial x} + \frac{\partial \mathfrak{E}_y}{\partial y} + \frac{\partial \mathfrak{E}_z}{\partial z}$ im allgemeinen nicht verschwindet, so hat die rechte Seite die Bedeutung einer 4π-fachen räumlichen Ladungsdichte. Wir bezeichnen sie daher mit $4\pi\varrho'$. Da wir wahre räumliche Ladungen direkt ausgeschlossen haben, so kann es sich nur um freie Ladungen handeln, ähnlich wie vorhin. Aber doch mit einem Unterschiede. Denn in den früheren Fällen traten freie Ladungen nur dort auf, wo bereits wahre vorhanden waren; die freie Ladung erhielt man ja durch Division der wahren mit ε. Hier dagegen treten freie Ladungen auf, wo gar keine wahren vorhanden sind. Betrachtet man den Wert von ϱ' genauer, so sieht man, daß er dort auftritt, wo das Medium variiert, da nur dort

$$\frac{\partial\varepsilon}{\partial x},\ \frac{\partial\varepsilon}{\partial y},\ \frac{\partial\varepsilon}{\partial z}$$

von Null verschieden sind. Diese Ladung kann man auch als „Influenzladung" betrachten, die an gewissen Stellen des Dielektrikums auftritt. Darin liegt die größere Komplikation gegen früher, da bisher nur auf Leitern solche Influenzladungen auftraten. Die Dichte dieser influenzierten Ladung ist im allgemeinen erst angebbar, wie aus (41) hervorgeht, wenn $\mathfrak{E}_x\ \mathfrak{E}_y\ \mathfrak{E}_z$, d. h. das gesuchte Feld, bereits bekannt sind. Darin beruht die besondere Schwierigkeit dieser Aufgabe. Das ist aber nichts anderes, als das oben bereits qualitativ erschlossene Resultat.

Derartige influenzierte Ladungen treten natürlich auch dann auf, wenn das Medium sich sprungweise ändert, d. h. an der Berührungsfläche zweier verschiedener Dielektrika.

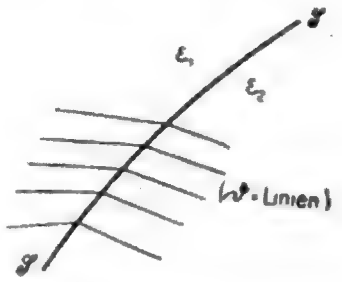


Fig. 14c.

Es sei in Figur 14c die Trennungsfläche zweier Dielektrika mit den D. K. ε_1 und ε_2. Wir legen eine geschlossene Fläche f so, daß sie zum Teil im ersten, zum Teil im zweiten Medium verläuft. Bezeichnen wir mit n die Normale der Trennungsfläche, die vom Medium 1 nach dem Medium 2 weist, so folgt durch Anwendung des Gaußschen Satzes (38b) leicht, da wahre Flächenladungen ausgeschlossen sind:

$$(\mathfrak{D}_n)_1 = (\mathfrak{D}_n)_2 = 0.$$

Diese Gleichung bedeutet, daß auf der Trennungsfläche keine Verschiebungslinien ($\mathfrak{D}$-Linien) endigen oder entstehen; wir haben sie bereits oben in (35) gerade daraus gewonnen.

Die Indizes 1 und 2 bedeuten dabei, daß $\mathfrak{D}_n$ einmal im ersten, einmal im zweiten Medium an der Trennungsfläche zu bilden ist. Wenn wir für $\mathfrak{D}$ seinen Wert einsetzen, so ist:

$$(42)\qquad \varepsilon_1\mathfrak{E}_{n_1} - \varepsilon_2\mathfrak{E}_{n_2} = 0.$$

Rechnet man den Ausdruck $\mathfrak{E}_{n_1} - \mathfrak{E}_{n_2}$ aus, so folgt

$$(43)\qquad \mathfrak{E}_{n_1} - \mathfrak{E}_{n_2} = \frac{\mathfrak{E}_{n_2}}{\varepsilon_1}(\varepsilon_2 - \varepsilon_1) = 4\pi\eta',$$

d. h. daß auf der Trennungsfläche Kraftlinien ($\mathfrak{E}$-Linien) endigen oder neu entstehen.

Die Differenz $\mathfrak{E}_{n_1} - \mathfrak{E}_{n_2}$ gibt also die

Digitized by Google

4π fache Flächendichte an und ist daher in (43) durch $4\pi\eta'$ bezeichnet. Es tritt also wieder, obwohl wahre Ladungen fehlen, an der Trennungsfläche, wo die D. K. sich sprungweise ändert, Influenzladung des Dielektrikums auf. Der Wert derselben ist gleichfalls erst bekannt, wenn die Aufgabe schon gelöst ist. Wir können also allgemein sagen, daß außer an Leitern auch an den Stellen des Dielektrikums Influenzladungen auftreten, an denen die D. K. — sei es stetig, sei es sprungweise — variabel ist.

3b) Lösung spezieller Fälle. Als Beispiel nehmen wir wieder den Fall des Plattenkondensators. Zwischen den Metallplatten befinde sich ein Dielektrikum von variabler D.K. Der Einfachheit halber nehmen wir an, daß dieselbe nur von x abhängig sei und setzen dafür etwa an:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \alpha x,$$

wo α eine Konstante bedeutet. Wahre elektrische positive Ladung e/S findet sich auf Platte 1; Influenzladung von demselben Betrage, aber umgekehrtem Vorzeichen auf der zweiten Platte. Ferner ist im Innern freie (influenzierte) räumliche Ladung vorhanden, da nach Voraussetzung $\frac{\partial \varepsilon}{\partial x} = \alpha + 0$ ist. Man erkennt ohne weiteres, da hier einfach $\mathfrak{D}_x$ an Stelle von $\mathfrak{E}_x$ tritt, daß wir hier analog Gleichung (13) haben:

$$\mathfrak{D}_x = 4\pi e/S;$$

Also: (44) $$\mathfrak{E}_x = \frac{4\pi e}{S e} = \frac{4\pi e}{S(\varepsilon_0 + \alpha x)}$$

Für die Differenz der Potentiale der beiden Platten liefert die Theorie, da diese gleich der Arbeit ist, die geleistet werden muß, um die Einheitsladung von Platte 2 auf Platte 1 zu schaffen:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \int_1^1 \mathfrak{E}_x \, dx = \int_{x=0}^{x=d} \mathfrak{E}_x \, dx =$$

(45) $$\frac{4\pi e}{S\alpha} \log\left(1 + \frac{\alpha d}{\varepsilon_0}\right)$$

also ist die Kapazität C dieses Kondensators:

(46) $$C = \frac{S\alpha}{4\pi \log\left(1 + \frac{\alpha d}{\varepsilon_0}\right)}$$

Ebenso leicht läßt sich der Fall behandeln, daß der Kondensator zur Hälfte mit einem Medium von der D.K. ε_1, zur anderen Hälfte mit einem solchen der D.K. ε_2 erfüllt sei (Fig. 15).

Leichte Rechnungen ergeben als Resultat für die Kapazität dieses Kondensators:

(47) $$C = \frac{S\varepsilon_1\varepsilon_2}{S\pi d(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)}$$

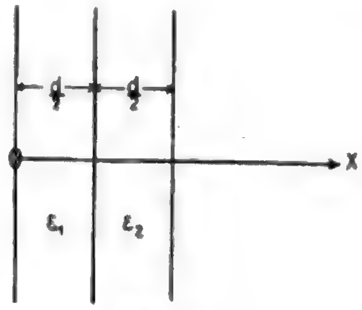


Fig. 15.

Schließlich wollen wir noch, was allerdings ohne ausgiebige Verwendung höherer Mathematik nicht gelingt — das Problem behandeln, daß in ein ursprünglich homogenes Feld im Vakuum eine Kugel von der D. K. hineingebracht wird. Der Kugelradius sei R. Welches ist das resultierende Feld in der Kugel und im Außenraum?

Wir haben zunächst für das Potential φ_0 des ursprünglichen Feldes offenbar:

$$\Delta\varphi_0 = 0$$

$$-\frac{\partial\varphi_0}{\partial x} = \mathfrak{E}_{0x} = A, \quad -\frac{\partial\varphi_0}{\partial y} = \mathfrak{E}_{0y} = B,$$

$$-\frac{\partial\varphi}{\partial z} = \mathfrak{E}_{0z} = C,$$

wenn mit A, B, C die Komponenten des konstanten Feldes bezeichnet werden. Nehmen wir die Richtung des Feldes zur x-Achse, so ist einfacher $B = C = 0$. Wird nun die Kugel eingebracht, so wird dies Feld gestört. Wir haben zur Bestimmung des neuen für das Potential φ die Gleichung:

(48) $$\Delta\varphi = 0$$

Diese geht nämlich aus (41) hervor, wenn man φ einführt und berücksichtigt, daß

$$\frac{\partial\varepsilon}{\partial x} = \frac{\partial\varepsilon}{\partial y} = \frac{\partial\varepsilon}{\partial z} = 0$$

ist. Da die Störung durch die Kugel im Unendlichen verschwindet, so herrscht dort das ungestörte Feld; also:

(49) $$\left(\frac{\partial\varphi}{\partial x}\right)_\infty = -A, \left(\frac{\partial\varphi}{\partial y}\right)_\infty = \left(\frac{\partial\varphi}{\partial z}\right)_\infty = 0.$$

An der Trennungsfläche müssen die Potentialwerte für Innenraum (φ_i) und Außenraum (φ_a) stetig ineinander übergehen, und da keine wahren Flächenladungen vorhanden sind, liefert der Gaußsche Satz (42) noch die zweite der folgenden Gleichungen:

(50) $$\left.\begin{array}{c}\varphi_i = \varphi_a \\ \varepsilon \frac{\partial\varphi_i}{\partial n} = \frac{\partial\varphi_a}{\partial n}\end{array}\right\} \text{ an der Kugeloberfläche.}$$

Führen wir Polarkoordinaten r, ϑ ein (die dritte Koordinate ψ ist überflüssig, da um die x-Achse alles symmetrisch ist, die Erscheinungen also nicht von ψ abhängen können) und nehmen den Kugelmittelpunkt als Koordinatenanfangspunkt, so geht (48) durch die Koordinatentransformation über in:

(51) $$\frac{\partial^2}{\partial r^2}(r\varphi) + \frac{1}{r \sin\vartheta} \cdot \frac{\partial}{\partial\vartheta}\left(\sin\vartheta \frac{\partial\varphi}{\partial\vartheta}\right) = 0,$$

die durch den Ansatz

Digitized by Google

$$(52)\qquad \varphi(r,\vartheta) = u(r)\,.\cos\vartheta$$

lösbar ist, wo u eine Funktion von r allein ist. Für u ergibt sich dann:

$$(53)\qquad \frac{d^2(ru)}{dr^2} - \frac{2u}{r} = 0.$$

Man erkennt leicht, daß die Lösungen sind:

$$u_1 = r;\; u_2 = \frac{1}{r^2},$$

also folgt allgemein für u, wenn B und C zwei Konstanten sind:

$$u = Br + \frac{C}{r^2},$$

also nach (52):

$$\varphi(r\vartheta) = \left\{Br + \frac{C}{r^2}\right\}\cos\vartheta;$$

speziell ist für den Innenraum (Index i) und den Außenraum (Index a):

$$\varphi_a = \left(B_a\cdot r + \frac{C_a}{r^2}\right)\cos\vartheta$$

$$\varphi_i = B_i r\cdot\cos\vartheta,$$

da C_i gleich Null sein muß, damit φ_i für $r = 0$ endlich bleibt. Da $\cos\vartheta = \frac{x}{r}$ ist, kann man auch schreiben:

$$(55)\qquad \begin{cases} \varphi_a = B_a\,.\,x + \dfrac{C_a x}{r^3}, \\ \varphi_i = B_i x \end{cases}$$

Bilden wir nun

$$\left(\frac{\partial\varphi}{\partial x}\right)_\infty,\; \left(\frac{\partial\varphi}{\partial y}\right)_\infty,\; \left(\frac{\partial\varphi}{\partial z}\right)_\infty,$$

so erhält man, daß:

$$\left(\frac{\partial\varphi}{\partial x}\right)_\infty = B_a;\; \left(\frac{\partial\varphi}{\partial y}\right)_\infty = \left(\frac{\partial\varphi}{\partial z}\right)_\infty = 0,$$

also muß nach (49) $B_a = -A$ sein. Wir haben also nach (55):

$$\varphi_a = -Ax + \frac{C_a\,.\,x}{r^3};\; \varphi_i = B_i\,.\,x.$$

Die Gleichung (50) liefert für $r = R$ (Kugeloberfläche) die Bedingungen

$$-A + \frac{C_a}{R^3} = B_i,$$

$$A - \frac{2C_a}{R^3} = -\varepsilon B_i.$$

Daraus folgen für C_a und B_i die Werte:

$$C_a = AR^3\frac{\varepsilon-1}{\varepsilon+2}$$

$$B_i = -3A\frac{1}{\varepsilon+2}.$$

Also ist endlich für die Potentiale:

$$(56)\qquad \begin{cases} \varphi_a = -Ax + AR^3\dfrac{\varepsilon-1}{\varepsilon+2}\cdot\dfrac{x}{r^3}, \\ \varphi_i = -\dfrac{3A}{\varepsilon+2}x. \end{cases}$$

Daraus folgt das merkwürdige Resultat, daß:

$$\mathfrak{E}_x{}^i = -\frac{\partial\varphi_i}{\partial x} = \frac{3A}{\varepsilon+2} = \text{const},\; \mathfrak{E}_y{}^i = \mathfrak{E}_z{}^i = 0 \text{ ist,}$$

d. h. daß das Feld im Inneren der Kugel homogen in Richtung des ursprünglichen Feldes ist. Im Außenraum natürlich wird das ursprüngliche Feld durch die Kugel gestört. Figur 16 veranschaulicht den Kraftlinienverlauf.

Es sei erwähnt, daß für den Innenraum eines Ellipsoides das nämliche sich nachweisen läßt.

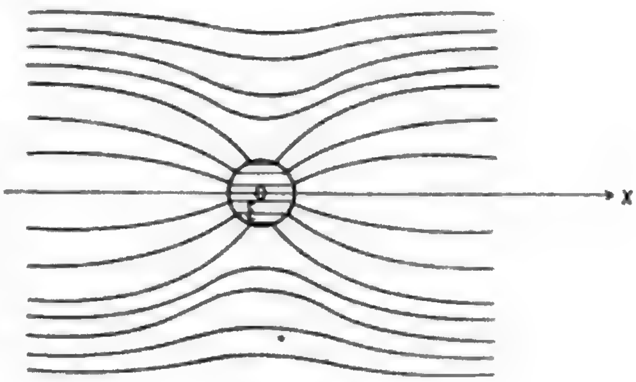


Fig. 16.

4. Energie und ponderomotorische Kräfte. 4a) Die elektrostatische Energie. Das elektrische Feld ist der Sitz von potentieller Energie. Der analytische Ausdruck derselben läßt sich in zwei äußerlich verschiedenen Formen darstellen, je nachdem man von der Faraday-Maxwellschen Vorstellung der Nahewirkung oder von der Fernwirkungstheorie ausgeht. Beide Ausdrücke lassen sich (mit Hilfe des Greenschen Satzes) ineinander überführen.

Wir bilden zuerst den der Nahewirkungstheorie entsprechenden Ausdruck der elektrischen Energie, die wir E nennen wollen. Man kann sich die Verschiebung $\mathfrak{D}$ so vorstellen, daß in jedem Volumenelement des Isolators durch die wirkende Kraft $\mathfrak{E}$ eine Verschiebung der positiven und negativen Ladung des Volumenelements hervorgebracht wird. Zu einer Verschiebung $\mathfrak{D}$ ist Arbeit erforderlich; wir setzen die unendlich kleine Arbeit dA proportional $\mathfrak{E}$ und der unendlich kleinen Verschiebung $d\mathfrak{D}$. Also, wenn der Proportionalitätsfaktor $= \frac{1}{4\pi}$ gesetzt wird:

$$dA = \frac{1}{4\pi}\mathfrak{E}d\mathfrak{D} = \frac{\varepsilon}{4\pi}\mathfrak{E}d\mathfrak{E};$$

also ist nach Integration die Arbeit pro Volumeneinheit:

$$A = \frac{\varepsilon}{8\pi}\mathfrak{E}^2 = \frac{1}{8\pi}\mathfrak{E}\mathfrak{D},$$

die in Form elektrischer Energie aufgespeichert bleibt. Also ist die im ganzen Felde vorhandene Energie:

$$(57)\qquad E = \frac{1}{8\pi}\int\mathfrak{E}\mathfrak{D}d\tau = \frac{1}{8\pi}\int\varepsilon\mathfrak{E}^2 d\tau.$$

Dieser Ausdruck kann auf einfache Weise umgeformt werden, wenn man die Arbeit berechnet, die notwendig ist, um einen unge-

Digitized by Google

ladenen Körper, etwa eine Kugel, auf die Ladung e_1 zu bringen. Denn diese Arbeit ist gleich der dadurch erzeugten elektrostatischen Energie. Der Körper habe bereits die Ladung e und wir wollen sie um de vermehren. Diese Ladung de befinde sich im Abstande r vom Mittelpunkte der Kugel. Dann übt e auf de die abstoßende Kraft nach dem Coulombschen Gesetze aus: $\frac{e\,de}{r^2}$.

Nähern wir de jetzt um das Stück dr, wird die geleistete Arbeit:

$$-\frac{e\,de\,dr}{r^2}$$

und wenn wir schließlich aus der Unendlichkeit bis an die Kugeloberfläche (r = R) herangehen, so folgt durch Integration die Arbeit, die geleistet werden muß, um die Ladung der Kugel von e auf e + de zu vermehren:

$$\text{(58a)} \qquad dA = -e\,de\int_\infty^R \frac{dr}{r^2} = \frac{e\,de}{R}.$$

Vermehren wir endlich die Ladung nicht um de, sondern von 0 anfangend bis die Ladung e_1 erreicht ist, so ist die gesamte dazu notwendige Arbeit:

$$\text{(58b)} \quad A = \int dA = \int_0^{e_1} \frac{e\,de}{R} = \frac{e^2_1}{2R} = \frac{1}{2}\, e_1\varphi_1,$$

da $\frac{e_1}{R}$ das Potential φ_1 der Kugel ist. Das gilt ganz allgemein, so daß, wenn wir i Körper haben, wir schreiben können, da A gleich der gewonnenen elektrostatischen Energie ist:

$$\text{(59)} \qquad E = \frac{1}{2}\,\Sigma_i e_i \varphi_i.$$

und dies ist die der Fernwirkungstheorie entsprechende Form der elektrostatischen Energie, aus der sich die Werte für die ponderomotorischen Kräfte nunmehr leicht ableiten lassen.

4b) Die ponderomotorischen Kräfte. Die in das elektrostatische Feld eingebetteten Leiter und Isolatoren erfahren Bewegungsantriebe, was aus dem Vorhandensein der wahren und influenzierten Ladungen auf ihnen verständlich wird. Es handelt sich um das Problem, die Größe der ponderomotorischen Kräfte zu berechnen. Das geschieht mit Hilfe des vorhin aufgestellten Ausdrucks für die Energie des elektrostatischen Feldes. Wir geben nur den Gedankengang an:

Für das elektrostatische Feld hat die elektrische Energie die nämliche Bedeutung, wie die potentielle Energie für die Mechanik; d. h. die Abnahme der potentiellen Energie bei einer virtuellen Verrückung ist gleich der von den ponderomotorischen Kräften geleisteten Arbeit. Wenn wir die Kraftkomponenten pro Volumeneinheit $\mathfrak{f}_x$, $\mathfrak{f}_y$, $\mathfrak{f}_z$ nennen, so ist die Arbeit, die bei einer unendlich kleinen Verrückung δx, δy, δz im ganzen Felde geleistet wird:

$$\text{(60)} \quad dA = \int [\mathfrak{f}_x\delta_x + \mathfrak{f}_y\delta_y + \mathfrak{f}_z\delta_z]dt.$$

Wir müssen die Abnahme der Energie in die nämliche Form bringen:

$$\text{(61)} \qquad -dE = \int [\alpha\delta_x + \beta\delta_y + \gamma\delta_z]d\tau,$$

wo $\alpha\beta\gamma$ zu bestimmen sind. Dann ergibt der Vergleich sofort die Größe der ponderomotorischen Kraft. Die Verrückung muß natürlich so erfolgen, daß während derselben stets das elektrische Gleichgewicht gewahrt bleibt, damit man eben überhaupt die Formeln der Elektrostatik benutzen kann. Die etwas komplizierte Rechnung liefert nun für die ponderomotorischen Kräfte pro Volumeneinheit folgende Ausdrücke:

$$\text{(62)} \qquad \left\{\begin{aligned} \mathfrak{f}_x &= \varrho\mathfrak{E}_x - \frac{1}{2}\,\mathfrak{E}^2\frac{\partial\varepsilon}{\partial x}, \\ \mathfrak{f}_y &= \varrho\mathfrak{E}_y - \frac{1}{2}\,\mathfrak{E}^2\frac{\partial\varepsilon}{\partial y}, \\ \mathfrak{f}_z &= \varrho\mathfrak{E}_z - \frac{1}{2}\,\mathfrak{E}^2\frac{\partial\varepsilon}{\partial z}, \end{aligned}\right.$$

Man erkennt also, daß zu dem gewissermaßen erwarteten Gliede $\varrho\mathfrak{E}_x$, $\varrho\mathfrak{E}_y$, $\sigma\mathfrak{E}_z$, das dem Coulombschen Gesetze entspricht, im allgemeinen noch ein Glied hinzutritt, nämlich falls ε variiert. Dieses Zusatzglied der ponderomotorischen Kraft tritt dadurch in direkte Beziehung zu den an eben diesen Stellen influenzierten Ladungen. Dieses Zusatzglied ist von großer Bedeutung, z. B. würde die Kraft zwischen zwei geladenen dielektrischen Kugeln von der D. K. ε, die sich im Vakuum befinden, dem Coulombschen Gesetze nicht gehorchen, da an der Oberfläche die D. K. einen Sprung erleidet. Erst die Kenntnis dieses Ausdrucks (62) ermöglicht ein Verständnis selbst für die elementarsten Versuche der Elektrizitätslehre. Denn weshalb wird ein ungeladenes Papierschnitzelchen von einem elektrisch geladenen Körper angezogen? Das Coulombsche Gesetz kann dieses offenbar nicht erklären, da ja nur eine Ladung vorhanden ist; oder um an Formel (61) anzuknüpfen, für den angezogenen Körper ist ja ϱ, die wahre Ladungsdichte, = 0. Da aber tritt das zweite Glied im Ausdruck der ponderomotorischen Kraft $-\frac{1}{2}\,\mathfrak{E}^2\frac{\partial\varepsilon}{\partial x}\ldots$ in Wirkung, da ja an der Oberfläche der Papierschnitzel die D. K. variiert, also wenigstens eine der Größen $\frac{\partial\varepsilon}{\partial x}, \frac{\partial\varepsilon}{\partial y}, \frac{\partial\varepsilon}{\partial z}$ von Null ver-

Digitized by Google

schieden ist. Dieses Beispiel zeigt die fundamentale Bedeutung der oben gegebenen Ausdrücke für die ponderomotorische Kraft.

Was die Berechnung der ponderomotorischen Kräfte angeht, so ist zu bemerken, daß dieselben erst bekannt sind, wenn das elektrische Feld bekannt ist, d. h. wenn das elektrostatische Problem bereits gelöst ist. Hier liegt also dieselbe Schwierigkeit vor wie bei der Berechnung der freien Ladungen. Sind die Kräfte gefunden, so sind die Bewegungserscheinungen der Körper nach den Gesetzen der Mechanik zu berechnen.

Literatur. *a) Zusammenfassende Werke:* **Abraham und Föppl**, *Theorie der Elektrizität, 4. Aufl., Leipzig 1912. 2. Abschn.* — **E. Cohn**, *Das elektromagnetische Feld, Leipzig 1900. Kap. I.* — **H. von Helmholtz**, *Vorlesungen über theoretische Physik, Leipzig 1907. Bd. 4.* — **Maxwell**, *Lehrbuch der Elektrizität und des Magnetismus. Deutsche Ausgabe, Berlin 1883. Bd. I, Teil 1, Kap. 1 bis 13.* — **Riemann-Weber**, *Partielle Differentialgleichungen, Braunschweig 1900. Bd. I, Abschn. 15 und 16.* — **Schaefer**, *Einführung in die Maxwellsche Theorie, Leipzig 1908. Kap. I.* — *b) Originalabhandlungen:* **W. Thomson**, *Papers on Elektrostatics and Magnetism. London 1884.* — **H. Hertz**, *Ueber die Grundgleichungen der Elektrodynamik im ruhenden Körper, Werke, Leipzig 1892. Bd. II, S. 208.* — **G. Green**, *Crelles Journal, Bd. 39, abgedr. in Ostwalds Klassiker, Bd. 39.* — **G. Kirchhoff**, *Gesammelte Abhandlungen. 1882.* — **F. Neumann**, *Werke, Leipzig 1912. Bd. III.* — **C. Neumann**, *Theorie der Elektrizitäts- und Wärmeverteilung in einem Ringe. Halle 1864.* — **E. Neumann**, *Crelles Journal, Bd. 110.* — **Poisson**, *Bull. soc. philomat. 1824.*

C. Schaefer.

Elektrische Leistung.

1. Definition der elektrischen Leistung. 2. Einheit der elektrischen Leistung. 3. Theorie der Leistungsberechnung: a) Gleichstrom. b) Wechselstrom. c) Stromsysteme. 4. Meßmethoden: a) Gleichstrom. b) Wechselstrom: Dynamometrische Methode und Konstruktion dynamometrischer Leistungsmesser. Elektrometrische Methode. Drehfeldmeßgeräte: Dreispannungsmesser-Dreistrommessermethode. 5. Anwendungen.

1. Definition der elektrischen Leistung. Unter Leistung versteht man in der Physik allgemein die einem System in der Zeiteinheit zugeführte Energie, oder den Quotienten aus der gesamten zugeführten Energie durch die Zeit, während welcher die Energieänderung stattfand. Dabei ist vorausgesetzt, daß diese Aenderung zeitlich gleichmäßig erfolgt. Ist das nicht der Fall, so ändert sich auch die Leistung von Augenblick zu Augenblick, und man erhält ihren Augenblickswert, indem man die in einem Zeitelement dt zugeführte Energie dQ bestimmt und den Quotienten dQ/dt bildet.

Diese allgemeinen Festsetzungen sind auch für die elektrische Leistung gültig. Die Form, durch welche man einem System elektrische Energie zuzuführen oder zu entnehmen pflegt, ist der elektrische Strom. Erfolgt die Zuführung (bezw. Entnahme) nur an einer Stelle durch eine Hin- und eine Rückleitung in der Form von Gleichstrom bei konstanten Spannungen (stationärer Zustand), so ist die zugeführte Energie proportional dem Produkt aus der Spannung zwischen den Zuführungen und der Elektrizitätsmenge, welche durch die Zuführungen fließt; die elektrische Leistung ist somit proportional dem Produkt aus Spannung und Stromstärke. Dieses Gesetz gilt unabhängig davon, aus welcher Quelle die elektrische Energie stammt und in welcher Weise sie in dem System, dem sie zugeführt wird, verzehrt wird; auch die Art, wie sich der Strom im Innern des Systems verzweigt, ist hierfür gleichgültig.

Sind Spannungen und Ströme veränderlich, so erhält man den Augenblickswert der Leistung, indem man die zugehörigen Augenblickswerte von Strom und Spannung miteinander multipliziert.

2. Einheit der elektrischen Leistung. Die Einheit der elektrischen Leistung ist das Watt (abgekürzt W). Man erhält die Leistung eines elektrischen Stromes in Watt, indem man den in Ampere gemessenen Strom mit der in Volt gemessenen Spannung multipliziert, welche den Strom durch die Leitung treibt, d. h. ein Watt wird pro Sekunde in einem Stromkreis verbraucht, in welchem bei 1 Volt Spannungsabfall ein Strom von 1 Ampere zustande kommt.

Neben dem Watt werden folgende Vielfache als Einheiten gebraucht: 1 Kilowatt (abgekürzt kW)=1000 Watt, 1 Megawatt (abgekürzt MW)=1000000 Watt.

Die Definitionen von Volt und Ampere beruhen zwar auf dem elektromagnetischen cgs-System, sie stimmen aber streng genommen nicht genau mit den cgs-Einheiten überein, sondern sind durch Reichsgesetz vom 1. Juni 1898 in einer experimentell reproduzierbaren Weise praktisch so festgelegt, daß sie den cgs-Einheiten möglichst nahe kommen. Daher stimmt auch das aus Volt und Ampere definierte Watt streng genommen nicht genau mit der aus dem cgs-System abgeleiteten Einheit überein, sondern weicht davon um einen nicht genauer bekannten Betrag ab.

Als Einheit der Leistung im cgs-System ist die Arbeit von 1 Erg anzusehen, wenn sie in 1 Sekunde vollbracht wird. Das Watt ist fast genau das 10^7fache dieser Einheit.

Neben dieser Einheit wird noch die Pferdestärke (abgekürzt PS) gebraucht. Man ver-

Digitized by Google

steht darunter die Leistung, die erforderlich ist, um ein Gewicht von 75 kg in 1 sk um 1 m zu heben. Daraus ergibt sich der Zusammenhang 1 PS = 735 Watt.

In neuerer Zeit ist man bestrebt, die Pferdestärke als Einheit zu beseitigen; dies ist berechtigt, weil sie in das cgs-System nicht hineinpaßt und ihre Größe von der Erdschwere g abhängig ist. Man will daher künftig auch mechanische Leistungen wie z. B. die Leistung von Motoren in Watt bezw. Kilowatt ausdrücken.

3. Theorie der Leistungsberechnung.

3a) Gleichstrom. Ein Leiter vom Widerstand r Ohm (Ω) werde von einem Gleichstrom von J Ampère durchflossen; findet in dem Leiter keine Elektrolyse statt, hat der Strom keine mechanische Arbeit zu leisten und wird in ihm keine EMK induziert, so ist nach dem Ohmischen Gesetz

$$\varphi_1 - \varphi_2 = Jr$$

wo φ_1 und φ_2 die Potentiale von Anfang und Ende der Leitung bedeuten. Die in dem Leiter verbrauchte Leistung ist also

$$(\varphi_1 - \varphi_2)J = J^2r.\,\text{Watt}$$

Sie wird vollständig in Wärme umgewandelt, d. h. es wird in jeder Sekunde für je 1 Watt eine Wärmemenge von

0,239 g-Kal

erzeugt.

Die in einem Widerstande r vom Strom J erzeugte Wärme ist also proportional der Größe des Widerstandes und dem Quadrat der Stromstärke. Dieses Gesetz ist bei der Bemessung der Belastbarkeit von Leitungen und Widerständen wohl zu beachten.

Befindet sich zwischen den Punkten mit den Potentialen φ_1 und φ_2 eine Stromverzweigung, deren Teile ebenfalls nur Ohmische Widerstände enthalten, so erfolgt die Verteilung der Ströme auf die einzelnen Zweige derart, daß die gesamte elektrische Leistung ein Minimum wird.

Wir kehren zu dem Einzelleiter zurück, der eine Länge von l cm und einen Querschnitt von q cm² besitze. Dann verursacht die Potentialdifferenz $\varphi_1 - \varphi_2$ an den Enden ein gleichmäßiges elektrisches Feld im Innern des Leiters; die elektrische Feldstärke $\mathfrak{E}$ ist überall die gleiche und wird berechnet aus

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \mathfrak{E}l$$

d. h. sie ist gleich dem Potentialgefälle pro Längeneinheit. Weiter führen wir ein die Stromdichte $\mathfrak{S}$ gleich der Stromstärke pro cm²

$$J = \mathfrak{S}q$$

Dann wird die Leistung

$$(\varphi_1 - \varphi_2)J = \mathfrak{E}\mathfrak{S}.lq$$

Nun ist aber lq das Volumen des Drahtes und daher

$$\mathfrak{E}.\mathfrak{S}$$

die Leistung pro Volumeneinheit.

Diese Formel ist deshalb von Wichtigkeit, weil sie für jeden beliebigen, körperlich ausgedehnten Leiter verallgemeinert werden darf. In jedem Punkt eines solchen Leiters herrscht eine ganz bestimmte elektrische Feldstärke $\mathfrak{E}$ und eine ganz bestimmte Stromdichte $\mathfrak{S}$. Das Produkt beider gibt die auf die Volumeneinheit berechnete Leistung. Ist σ der spezifische Widerstand des Leiters, so ist

$$\mathfrak{E} = \sigma\mathfrak{S}$$

Man kann daher auch die Leistung pro Volumeneinheit aus

$$\sigma\mathfrak{S}^2$$

berechnen. Man erhält diese Leistung in Watt pro cm³, wenn man $\mathfrak{S}$ in Ampere pro cm² und σ als spezifischen Widerstand eines Leiters von 1 cm Länge und 1 cm² Querschnitt rechnet (der 10⁴ Teil des spezifischen Widerstands pro $\frac{m}{mm^2}$).

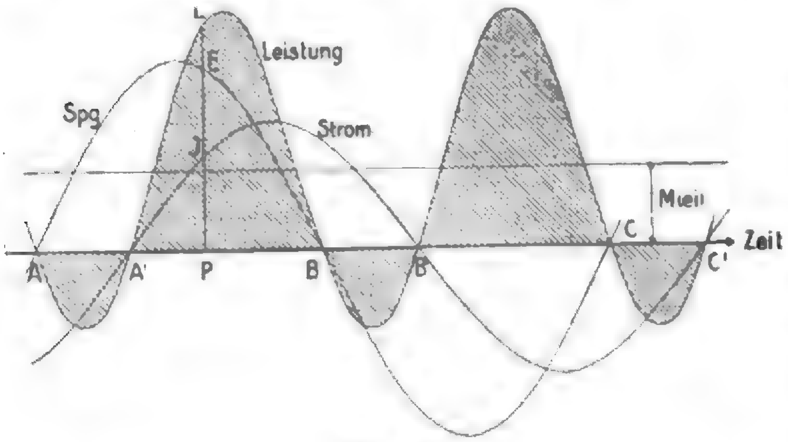


Fig. 1.

3b) Wechselstrom. Die Leistung eines Wechselstromes verändert sich von Augenblick zu Augenblick entsprechend dem Strom und der Spannung, die ihn erzeugt. Multipliziert man den Wert, den in einem Augenblick die Spannung und der Strom hat, so erhält man den Augenblickswert der Leistung. Nehmen wir an, daß auf irgendeine Weise (s. die Methoden der Kurvenaufnahme im Artikel „Elektrischer Strom" S. 299 ff.) der zeitliche Verlauf der Spannung E und des Stromes J aufgenommen ist; auf der Abszissenachse (Fig. 1) sind die Zeiten aufgetragen, als Ordinaten, die den einzelnen Zeitpunkten entsprechenden Werte der Spannung in Volt, des Stromes in Ampere. Man bildet nun für möglichst viel Abszissen das Produkt aus Strom und Spannung, z. B. PE × PJ = PL

Digitized by Google

und trägt den gefundenen Wert als Ordinate auf; auf diesem Wege ergibt sich eine periodische Kurve, welche den Wert der Leistung in jedem Augenblick darstellt. Man erkennt, daß auch die Leistungslinie periodisch verläuft, daß aber auf eine volle Welle der Spannung AC oder des Stromes A'C' zwei volle Wellen der Leistung entfallen. Die Leistung verläuft also mit einer Frequenz, die doppelt so groß ist, als die der erzeugenden Spannung und die des erzeugenden Stromes.

In den Punkten AA'BB'CC', wo entweder die Spannung oder der Strom null ist, ist es auch die Leistung, in den Intervallen A'B, B'C..., wo Strom und Spannung gleichgerichtet sind, ist die Leistung positiv; es wird Energie verbraucht. Demgegenüber gibt es Intervalle AA',BB',CC'.., in denen der Strom der Spannung entgegen gerichtet fließt, die

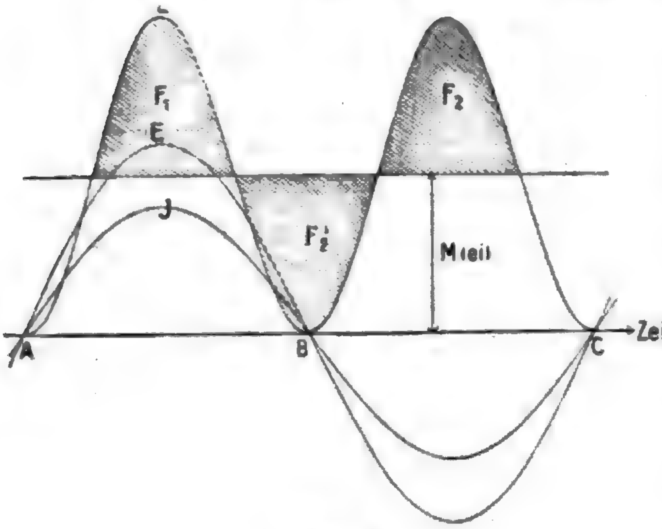


Fig. 2.

Leistung wird dort negativ, es tritt ein Energiegewinn auf. Verschiebt man die Kurven von Strom und Spannung gegeneinander, ohne ihre Form zu ändern, d. h. ändert man lediglich ihre Phasenverschiebung, so wird mit wachsender Phasenverschiebung die Dauer, während welcher die Leistung negativ ist, auf Kosten der Dauer der positiven Leistung größer. Von Interesse sind die beiden Grenzfälle.

1) A fällt auf A', B auf B'. Die Kurven haben keine Phasenverschiebung, die Leistungskurve fällt ganz in den positiven Teil. (Fig. 2).

2) A' liegt in der Mitte zwischen AB, B' in der Mitte zwischen BC usw. (Fig. 3).

Die Phasenverschiebung beträgt eine Viertelperiode oder in Winkeln ausgedrückt 90°. Die Leistungskurve verläuft oberhalb und unterhalb der Abszissenachse spiegelbildlich gleich, d. h. der Energieverlust in einer Viertelperiode ist ebenso groß wie der

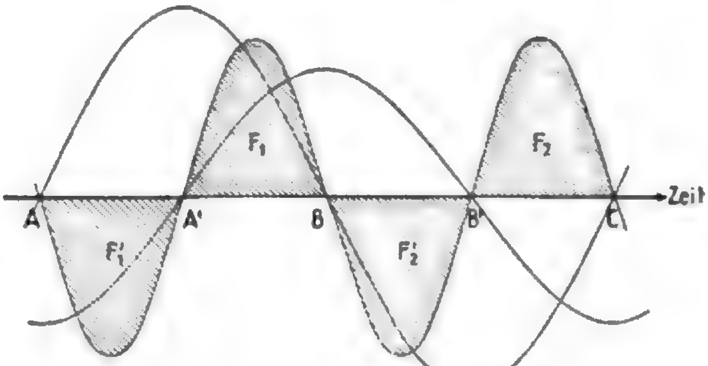


Fig. 3.

Energiegewinn in der nächsten.

In der Praxis interessiert in der Regel weniger der Verlauf der Augenblickswerte einer Leistung als ihr zeitlicher Mittelwert. Man findet diesen, indem man eine gerade Linie parallel der Abszissenachse verschiebt, bis die von dieser Linie und der Leistungskurve begrenzten Flächenstücke F_1 und F'_1, F_2 und F'_2.. einander gleich sind (Fig. 2 u. 3). Der Abstand dieser Linie von der Abszissenachse ist der Mittelwert der Leistung. Er sei im folgenden mit

$$M(ei)$$

bezeichnet. Die bisherigen Betrachtungen zeigen, daß der Mittelwert der Leistung am größten ist, wenn Strom und Spannung keine Phasenverschiebung haben. (Fig. 2) Verschiebt man die Phase, ohne die Stärke von Strom und Spannung zu ändern, so wird der Mittelwert der Leistung kleiner und kleiner (Fig. 1), bis er bei 90° Phasenverschiebung zu Null wird (Fig. 3).

Mathematisch lassen sich diese Sätze folgendermaßen darstellen:

1) Die Augenblickswerte von Strom und Spannung mögen einen sinusförmigen Verlauf haben.

$$e = e_m \sin\omega t$$
$$i = i_m \sin(\omega t - \varphi)$$

Darin bedeutet e und i die Augenblickswerte, e_m und i_m die Höchstwerte, die erreicht werden, wenn der Sinus gleich 1 wird, ω die sogenannte Kreisfrequenz ($= 2\pi \times$ Periodenzahl pro sk). Der Augenblickswert der Leistung ist:

$$ei = e_m i_m \sin\omega t . \sin(\omega t - \varphi)$$

Zerlegt man das Produkt der Sinus nach einem bekannten Satz der Goniometrie, so wird:

$$ei = \frac{1}{2} e_m\, i_m \left[\cos\varphi - \cos(2\omega t - \varphi)\right]$$

Die rechte Seite besteht aus einem von der

Digitized by Google

Zeit unabhängigen Gliede und einem, welches die doppelte Frequenz von e und von i hat. Der zeitliche Mittelwert des zweiten Gliedes ist Null, daher

$$L = M(ei) = \frac{1}{2} e_m i_m \cos \varphi$$

An Stelle der Höchstwerte führt man in diese Gleichung besser die der Messung leichter zugänglichen Effektivwerte E und J von Strom und Spannung ein. Es ist:

$$E = \frac{e_m}{\sqrt{2}} \quad J = \frac{i_m}{\sqrt{2}}$$

Dadurch wird der Mittelwert der Leistung

$$L = EJ \cos \varphi$$

In dieser Formel sind auch die beiden oben erörterten Grenzfälle enthalten; den Höchstwert der mittleren Leistung erhält man für die Phasenverschiebung $\varphi = o$

$$L_0 = EJ$$

dagegen wird für $\varphi = 90^0$

$$L_{\frac{\pi}{2}} = 0$$

während Strom und Spannung beliebige Werte haben können.

Der Faktor $\cos \varphi$ wird als Leistungsfaktor bezeichnet.

Sind die Kurven von Strom und Spannung nicht sinusförmig, so gestaltet sich die Berechnung der Leistung komplizierter. Eine von der Sinusform abweichende Kurve kann man stets zerlegen in eine Summe von vielen Sinuswellen, deren Perioden sich wie die ganzen Zahlen verhalten (F o u r i e r sche Reihe), d. h. außer der Grundwelle sind Oberwellen vorhanden, welche die doppelte, dreifache Frequenz wie die Grundwelle haben. Man nennt deshalb derartige Kurven mehrwellig im Gegensatz zur Sinusform, die als einwellig zu bezeichnen ist. Deutet man durch Indices die Ordnungszahlen der Oberwellen an, so kann man setzen:

$$e = e_1 + e_2 + e_3 + \ldots$$
$$i = i_1 + i_2 + i_3 + \ldots$$

Bildet man den Mittelwert aus dem Produkt ei, so ist zu berücksichtigen, daß die Mittelwerte aus zwei Kurven, welche verschiedene Frequenz haben, verschwinden, es bleibt also

$$M(ei) = M(e_1 i_1) + M(e_2 i_2) + M(e_3 i_3) + \ldots$$
$$= E_1 J_1 \cos \varphi_1 + E_2 J_2 \cos \varphi_2 + E_3 J_3 \cos \varphi_3 + \ldots$$

wo E_k J_k die Effektivwerte von der k^{ten} Oberwelle von Strom und Spannung bedeutet, φ_k ihre Phasenverschiebung. Man sieht, daß bei mehrwelligen Strömen ein einheitlicher Begriff für die Phasenverschiebung von e und i nicht mehr existiert.

Trotzdem pflegt man auch hier die Gleichung für einwellige Ströme

$$M(ei) = EJ \cos \Phi$$

anzusetzen und dadurch den Leistungsfaktor $\cos \Phi$ und die effektive Phasenverschiebung Φ zu definieren. Die Effektivwerte von Spannung und Strom sind durch die Gleichungen

$$E^2 = \frac{1}{2} (e_{m\,1}^2 + e_{m\,2}^2 + e_{m\,3}^2 + \ldots)$$

$$J^2 = \frac{1}{2} (i_{m\,1}^2 + i_{m\,2}^2 + i_{m\,3}^2 + \ldots)$$

definiert. Wie man sieht, sind sie in der Reihenentwicklung für M(ei) nicht als Faktoren enthalten; die Definition von $\cos \Phi$ enthält also eine physikalische Willkür und der Effektivwert von Φ ist eine von vielen Faktoren abhängige Größe, die keine einfache physikalische Bedeutung besitzt.

Verschiebt man die Kurven von e und i gegeneinander, ohne ihre Form zu ändern, so läßt sich nachweisen, daß es eine Lage gibt, in welcher

$$M(ei) = o$$

wird, die effektive Phasenverschiebung wird 90^0. Dagegen ist, wenn die Kurvenformen von e und i verschieden sind, keine Lage der Kurven zueinander ausfindig zu machen, für welche

$$M(ei) = EJ$$

ist; vielmehr bleibt stets

$$M(ei) < EJ$$

Die effektive Phasenverschiebung erreicht also, wenn die Kurvenform der Spannung von der des Stromes abweicht, nie den Wert Null. Nur, wenn die Kurvenformen einander gleich sind, gibt es eine Lage von e und i zueinander, in der $\Phi = o$ ist. In der Praxis ist der letztere Fall leicht zu realisieren, indem man eine mehrwellige Spannung durch einen induktionsfreien Widerstand schließt.

3c) Leistungsberechnung von Stromsystemen. α) Dreileitersystem für Gleichstrom. Das Dreileitersystem kann man sich dadurch entstanden denken, daß von zwei voneinander unabhängigen Stromkreisen

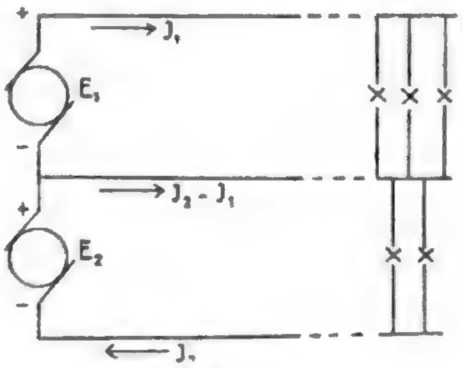


Fig. 4.

der positive Pol des einen mit dem negativen Pol des andern vereinigt wird. Sind E_1 und E_2 (Fig. 4) die Spannungen der beiden Energiequellen, J_1 und J_2 die Ströme, welche der

einen bezw. der anderen Energiequelle entnommen werden, so fließt in der gemeinsamen Leitung die Differenz der Ströme $J_1 - J_2$. Die Leistung des gesamten Systems ist:

$$L = E_1 J_1 + E_2 J_2$$

oder

$$L = \frac{1}{2}(E_1 - E_2)(J_1 - J_2) + \frac{1}{2}(E_1 + E_2)(J_1 + J_2)$$

Bei Elektrizitätswerken, welche diese Schaltung verwenden, pflegt nahezu

$$E_1 = E_2$$

zu sein, so daß angenähert

$$L = \frac{1}{2}(E_1 + E_2)(J_1 + J_2)$$

wird. Das zweite Glied der vorhergehenden Gleichung zeigt, welcher Fehler bei der Messung begangen wird. $E_1 + E_2$ ist die Spannung zwischen den „Außenleitern".

β) Drehstrom. Beim Drehstromsystem werden in einer Energiequelle drei Wechselspannungen gleicher Größe erzeugt, die in der Phase um je 120° verschoben sind. Sie werden entweder in Form eines Dreiecks oder eines Sternes zusammengeschaltet.

Seien P_1 P_2 P_3 (Fig. 5) die drei Pole eines Drehstromsystems, i_1 i_2 i_3 die Augenblickswerte der Ströme in den Leitungen, die von

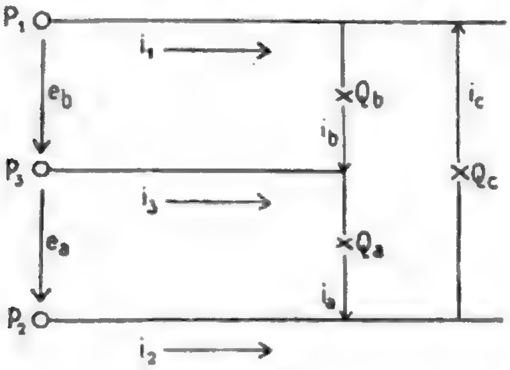


Fig. 5.

P_1 P_2 P_3 ausgehen, wobei alle drei Ströme in derselben Richtung positiv gerechnet werden. Da in jedem Augenblick die Summe der der Verbrauchsstelle zufließenden Ströme gleich der zurückfließenden Strommenge sein muß, so ist:

$$i_1 + i_2 + i_3 = o$$

zu setzen, oder

$$i_3 = -i_1 - i_2$$

Man kann also i_3 als die Rückleitung der beiden Ströme i_1 und i_2 auffassen, und die Gesamtleistung des gesamten Drehstromsystems auffassen als zusammengelegt aus zwei einphasigen Wechselstromleitungen. Die Spannung e_b zwischen P_1 und P_3 treibt den Strom i_1 durch die Leitung von P_1 hin und nach P_3 zurück; die Spannung $(-e_a)$ zwischen P_2 und P_3 treibt den Strom i_2 durch die Leitung von P_2 hin und nach P_3 zurück. Die Gesamtleistung des Drehstromes wird also ähnlich wie beim Dreileitersystem für Gleichstrom

$$M(e_b \, . \, i_1) + M(-e_a \, i_2)$$

Wie die Phasen der einzelnen Ströme und Spannungen liegen, erkennt man am besten, wenn man sich ein Diagramm zeichnet (die Länge der Linien ist den Effektivwerten der Ströme und Spannungen proportional, die Winkel zwischen den Linien gleich den Phasenverschiebungen). Liegen zwischen den Leitungen 12, 23, 31 gleich große induktionsfreie Lasten Q_a Q_b Q_c, so fließen in denselben drei Ströme i_a i_b i_c von gleicher Größe die mit den sie erzeugenden Spannungen e_a e_b e_c in Phase sind (Fig. 6). Die Ströme i_1 i_2 i_3

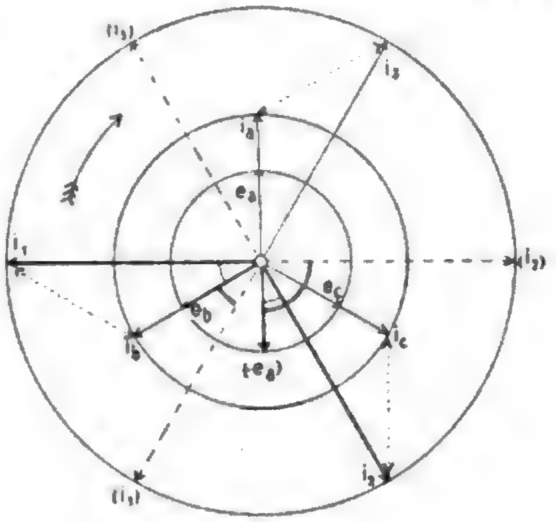


Fig. 6.

sind gleich der Differenz von je zwei Belastungsströmen

$$i_1 = i_b - i_c \quad i_2 = i_c - i_a \quad i_3 = i_a - i_b$$

Nach dem Ausdruck für die Leistung des Drehstromsystems sind die Mittelwerte e_b i_1 und $(-e_a) i_2$ zu bilden. Wie das Diagramm zeigt, schließt bei induktionsfreier Last jede dieser Spannungen mit dem zugehörigen Strom einen Winkel von 30° ein

$$\sphericalangle(e_b, i_1) = 30^0, \quad \sphericalangle(-e_a, i_2) = 30^0$$

Führt man also Effektivwerte ein, so wird

$$L = E_b J_1 \cos 30 + E_a J_2 \cos 30$$
$$= (E_b J_1 + E_a J_2) \frac{\sqrt{3}}{2}$$

und da die Effektivwerte der Spannungen sowohl wie der Ströme einander als gleich vorausgesetzt sind, so ist in einem vollständig symmetrischen und symmetrisch induktionsfrei belasteten Drehstromsystem die Leistung:

$$L = EJ\sqrt{3}$$

(E verkettete oder Dreieckspannung, J Linienstrom).

Es mag noch der Fall betrachtet werden,

Digitized by Google

wo die Belastung in den 3 Zweigen gleichmäßig, aber induktiv ist, und zwar mögen die Ströme i_a i_b i_c gegen die sie erzeugenden Spannungen um 60^0 nach rückwärts verschoben sein. i_1 i_2 erhalten dann die in der Figur gestrichelt gezeichneten Lagen (Buchstaben eingeklammert).

e_b und (i_1) schließen wiederum 30^0 ein; aber während bei induktionsfreier Last i_1 zeitlich vor e_b lag, liegt es jetzt dahinter, $(-e_a)$ und (i_2) schließen 90^0 ein, daher ist

$$M(-e_a i_2)=0$$

Bei beliebiger Phasenverschiebung φ wird die Formel für die Leistung:

$$L = EJ\cos(30^0-\varphi)+EJ\cos(30^0+\varphi)$$
$$= EJ\sqrt{3}\cos\varphi.$$

Durch zyklisches Vertauschen der Ströme und Spannungen in der Gleichung $L=M(e_b i_1)+M(-e_a i_2)$ und durch Addieren von zwei oder drei der so entstehenden Gleichungen gelangt man zu folgenden hin und wieder gebrauchten Formeln für die Leistung eines Drehstromsystems:

$$2L=M(e_c-e_a)i_2+M(e_1-e_3)e_b$$
$$3L=M(e_b-e_c)i_1+M(e_c-e_a)i_2+M(e_a-e_b)i_3$$
$$=M(e_b-e_c)(i_1-i_3)+M(e_c-e_a)(i_2-i_3)$$
$$=M(i_3-i_2)e_a+M(i_1-i_3)e_b+M(i_2-i_1)e_c$$

γ) Vierleitersystem. Das Drehstromsystem wird zum Vierleitersystem, wenn man vom Sternpunkt P_o (Fig. 7) eines in Stern geschal-

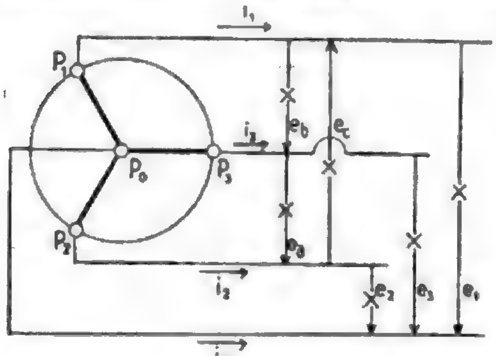


Fig. 7.

teten Drehstromgenerators ebenfalls eine Leitung ausgehen läßt; der Strom in diesem sogenannten „Nullleiter" sei i_0. Die Augenblickswerte der Ströme in den vier Leitungen müssen die Bedingung erfüllen:

$$i_1+i_2+i_3+i_0=o$$

Man kann also jede der Leitungen als Rückleitung für die drei andern auffassen und auf diese Weise sich für die Leistungsberechnung das Vierleitersystem in drei Einphasensysteme zerlegt denken. Wird i_0 als Rückleitung angesehen, so wird die Leistung

$$L=M(e_1 i_1)+M(e_2 i_2)+M(e_3 i_3)$$

Faßt man i_3 als Rückleitung auf, so ist:

$$L=M(e_b i_1)-M(e_a i_2)-M(e_3 i_0).$$

Diese Ueberlegungen lassen erkennen, daß sich die Leistung eines Vierleitersystems stets aus der Summe von drei Mittelwerten zusammensetzen läßt.

In der Praxis werden häufig vereinfachte Formeln benutzt, die in der Regel voraussetzen, daß die Summe der Augenblickswerte der drei Sternspannungen $(e_1+e_2+e_3)=0$ ist. Diese Voraussetzung trifft in den seltensten Fällen genau zu. Es ist daher nicht zu empfehlen, mit diesen vereinfachten Formeln zu arbeiten.

4. Meßmethoden. 4a) Gleichstrom. Zur Bestimmung der Leistung in einem Gleichstromkreise mißt man mit den üblichen Spannungs- und Strommessern die Spannung zwischen den beiden Zuführungspunkten und den gesamten in den Kreis hineinfließenden Strom; das Produkt aus Spannung und Strom ergibt die Leistung. Es empfiehlt sich nicht, hierfür besondere Leistungsmesser anzuwenden.

Beachtung erfordert der Eigenverbrauch der Apparate, der je nach der Schaltung verschieden in Rechnung zu setzen ist. Es bedeute (Fig. 8 und 9)

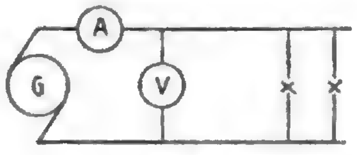


Fig. 8.

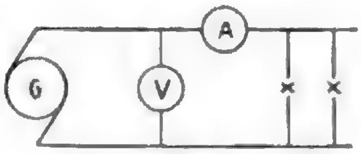


Fig. 9.

l_e die Leistung, welche im Spannungsmesser verbraucht wird
l_i die Leistung, welche im Strommesser A verbraucht wird
r_e den Widerstand des Spannungsmessers
r_i „ „ „ Strommessers
E am Spannungsmesser abgelesene Spannung
J am Strommesser abgelesenen Strom.

Also:

$$l_e = E^2/r_e \qquad l_i = J^2 r_i$$

Dann ist die von der Energiequelle G abgegebene Leistung

bei Schaltung I $EJ+l_e$
„ „ II $EJ+l_i$

die an die Belastung abgegebene Leistung

bei Schaltung I $EJ-l_i$
„ „ II $EJ-l_e$

Man wird zweckmäßig immer diejenige Schaltung wählen, bei welcher die Korrektion l_e beziehungsweise l_i die kleinere ist. Nen-

Digitized by Google

nenswerte Beträge erreicht die Korrektion nur bei der Messung kleinerer Leistungen.

4b) Wechselstrom. *a*) Dynamometrische Methode. In den allermeisten Fällen empfiehlt es sich Wechselstromleistungen mit dem Dynamometer zu messen. Ein Dynamometer besteht aus einem festen und einem beweglichen Spulensystem, die von Strömen durchflossen eine mechanische Kraftwirkung aufeinander ausüben. Federn oder Gewichte halten dieser Kraft das Gleichgewicht; an einer Skale wird eine der Kraftwirkung proportionale Größe abgelesen. Fließen in den beiden Spulensystemen zwei Gleichströme i und j, so ist die Kraft und damit die Ablesung α an der Skale proportional dem Produkt dieser Ströme:

$$ij = C\alpha$$

Man nennt C die dynamometrische Konstante des Apparates; ihre Größe hängt von den Konstruktionsdaten, das heißt den gewählten Abmessungen, Wahl und Anordnung der Federn beziehungsweise der Gewichte ab.

Ersetzt man die beiden Gleichströme durch zwei Wechselströme i_1 und j_1, welche beide dieselbe Frequenz haben, so ist die Kraftwirkung pulsierend; ihr Augenblickswert ist proportional $i_1 j_1$. Bei einigermaßen hohen Frequenzen vermag aber die bewegliche Spule den rasch wechselnden Impulsen nicht zu folgen und gemessen wird nur der zeitliche Mittelwert der Kraftwirkungen. Die Ablesung α an der Skale genügt also der Gleichung

$$M(i_1 j_1) = I_1 J_1 (\cos i_1, j_1) = C\alpha$$

Darin bedeutet C dieselbe dynamometrische Konstante, wie vorher. Ist C durch eine Gleichstrommessung bestimmt, so kann es ohne weiteres bei Wechselströmen zur Messung des zeitlichen Mittelwertes des Stromproduktes angewandt werden.

Dies ist aber nur dann richtig, wenn nicht in der Nähe der Spulen ausgedehnte Metallmengen vorkommen. Sind nämlich solche Metallmassen vorhanden, so werden in denselben durch die magnetischen Wechselfelder der Spulen Wirbelströme erzeugt, welche ebenfalls auf die bewegliche Spule mechanische Kräfte ausüben. Diese Kräfte treten aber bei der Bestimmung von C durch Gleichströme nicht auf. Es gilt daher bei der Konstruktion von Dynamometern als Regel, daß außerhalb der Stromleiter möglichst kein Metall, z. B. zur Befestigung, als Grundplatte usw. verwandt wird. Ist die Anwendung von Metall nicht zu umgehen, so muß durch einen besonderen Versuch geprüft werden, ob es eine störende Wirkung ausübt. Zu empfehlen sind für diese Zwecke schlecht leitende Legierungen.

Aber auch die Metallmassen des Stromleiters selber werden von den magnetischen Feldern durchsetzt, so daß namentlich bei der Verwendung massiver Spulen für große Stromstärken durch die in denselben erzeugten Wirbelströme fehlerhafte Messungen entstehen können. Man kann diesen Fehler durch geeignete Unterteilung des Kupfers vermeiden; am vollkommensten geschieht das in der Weise, daß der Stromleiter aus dünnen isolierten Drähten zusammengeflochten wird. Das Zusammenflechten oder Zusammendrehen muß nach einem gewissen Plan erfolgen, so daß jeder Einzeldraht von dem magnetischen Felde in gleicher Weise beeinflußt wird. In vielen Fällen genügt aber auch eine verhältnismäßig einfache Unterteilung.

Das Dynamometer wird zum Leistungsmesser, indem man den Arbeitsstrom I (Fig. 10), welcher die zu messende Leistung vollbringt, durch das eine Spulensystem S_f

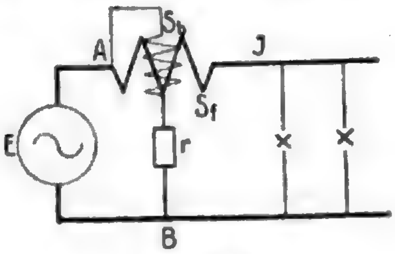


Fig. 10.

fließen läßt (in der Regel das feste); das andere Spulensystem S_b (in der Regel das bewegliche) erhält einen passenden Vorschaltwiderstand und wird wie ein Spannungsmesser zwischen den Punkten A und B an die Betriebsspannung E angeschlossen. Wird zunächst einmal die Selbstinduktion dieser sogenannten Spannungsspule gegenüber dem Vorschaltwiderstand vernachlässigt, so ist, wenn r der Gesamtwiderstand des Spannungskreises ist (Spule + Vorschaltwiderstand), $J_1 = E/r$ und die Eichung ergibt:

$$EI \cos(\sphericalangle E, I) = (Cr)\alpha$$

Die Ablesung α ist proportional der zu messenden Leistung; die Konstante des Apparates als Leistungsmesser ist Cr; sie wird also aus den dynamometrischen Konstanten durch Multiplikation mit dem Gesamtwiderstand des Spannungskreises gewonnen.

Dabei ist aber bisher die Selbstinduktivität l der Spannungsspule vernachlässigt worden. Sie ist fast stets so gering gegenüber dem Widerstand des Spannungskreises, daß sie bei der Berechnung der Stärke des Spannungsstromes vernachlässigt werden kann. Dagegen macht sich zuweilen die Phasenverschiebung δ bemerklich, welche der Spannungsstrom gegen die Spannung erfährt. Ist der Betriebsstrom I gegen die Spannung E um den Winkel φ verzögert, so beträgt die Phasenverschiebung zwischen Betriebsstrom und Spannungsstrom nur $\varphi - \delta$, und

Digitized by Google

die Ablesung des Leistungsmessers wird proportional

$$EJ\cos(\varphi-\delta)$$

δ ist in der Regel sehr klein, so daß es meist genügt mit folgenden Formeln zu rechnen:

$$\delta = \mathrm{tg}\frac{\omega l}{r} \quad (\omega = 2\pi \times \text{Frequenz})$$

$$EJ\cos\varphi = C\alpha(1 \pm \delta \mathrm{tg}\varphi)$$

Bei nacheilendem Strom I gilt das positive, bei voreilendem das negative Zeichen.

Eine weitere Fehlerquelle bilden elektrostatische Einflüsse. Befinden sich in der Nähe der beweglichen Spule Teile, die ein wesentlich anderes Potential, als die Spule besitzen, so treten elektrostatische Kräfte auf, die die Messung fälschen können. Es mögen folgende drei Möglichkeiten hervorgehoben werden:

a) Bei Zeigerinstrumenten kann das Deckglas vor dem Zeiger durch Putzen Reibungselektrizität erhalten und den Zeiger anziehen. Der Fehler ist durch Anhauchen des Glases leicht zu beseitigen.

b) Man muß es vermeiden, daß zwischen feststehenden und beweglichen Spulen größere Potentialdifferenzen entstehen. Demnach ist der Vorschaltwiderstand nicht zwischen A und Spule S_b (Fig. 10), sondern so wie in der Figur gezeichnet zwischen S_b und B anzuordnen. Dies ist auch schon aus dem Grund notwendig, weil die Isolation zwischen fester und beweglicher Spule nicht sehr groß gemacht werden kann, so daß man bei der fehlerhaften Schaltung eine Zerstörung des Apparates befürchten muß.

c) Wird mit dem Leistungsmesser eine Messung in einem Hochspannungskreise vorgenommen, so kommen bei geeigneter Isolierung des Apparates gegen Erde und der richtigen Schaltung (Fig. 10) beide Spulen S_f und S_b auf eine hohe Spannung gegen Erde. Um die elektrostatischen Kräfte der Umgebung auf die Hochspannung führende Spule auszuschließen, ist es am einfachsten das Gehäuse des Leistungsmessers mit Stanniol auszukleiden und mit der Hauptstromspule zu verbinden. Fürchtet man Wirbelströme in dem Schutzbelag, so muß man ihn durch geeignete Schnitte in Streifen unterteilen.

Es ist im allgemeinen nicht möglich einen Leistungsmesser dadurch für größere Stromstärken brauchbar zu machen, daß man zu der Hauptstromspule einen Nebenschlußwiderstand legt. Dies bei Gleichstrommessungen übliche Verfahren ist deshalb nicht ohne weiteres anwendbar, weil infolge der Induktivität der Spulen die Ströme in der Hauptstromspule und im Nebenschlußwiderstand eine andere Phase haben, als der unverzweigte Strom. Zulässig ist diese Schaltung nur, wenn der Nebenschlußwiderstand induktionsfrei ist, und der abgezweigten Hauptstromspule ein so großer Widerstand vorgeschaltet ist, daß ihre Induktivität dagegen nicht merklich ist. Die Bedingungen sind in der Regel nur bei hochempfindlichen Dynamometern mit Spiegelablesung erfüllbar.

β) Konstruktion der dynamometrischen Leistungsmesser. Im allgemeinen kann jedes richtig konstruierte Dynamometer (s. den Artikel „Elektrischer Strom") als Leistungsmesser gebraucht werden. Hierher gehören in erster Linie die empfindlichen Spiegelinstrumente.

Im folgenden sei eingehender auf die für technische Zwecke besonders konstruierten direkt ablesbaren Apparate eingegangen. Zunächst seien kurz die Torsionsdynamometer und Wagen erwähnt. Bei jenen ist die bewegliche Spule drehbar angeordnet und wird durch einen Torsionskopf in die der Stromlosigkeit entsprechende Gleichgewichtslage zurückgeführt. Bei den Wagen (Lord Kelvin) sind die beweglichen Spulen an den Enden eines Wagebalkens angeordnet und die Kraftwirkung wird durch ein Laufgewicht aufgehoben. Beide Konstruktionen sind veraltet.

Die neueren Konstruktionen der sogenannten Präzisionswattmeter ähneln in ihrem Aufbau äußerlich den modernen Drehspulapparaten für Gleichstrom. Die beweglichen Spulen haben verhältnismäßig kleine Abmessungen und sind mit zwei Stahlspitzen versehen, die in Steinen gelagert sind. Die Spulen sind ohne jeden Kern frei gewickelt und halten sich durch ihre eigene Steifigkeit. Die Stromzuführung erfolgt durch zwei Federn, die gleichzeitig die Richtkraft abgeben. Zur Dämpfung der Spulendrehungen ist an dem System ein Flügel befestigt, der sich in einem möglichst dicht geschlossenen Kasten bewegt. Zu einer wirksamen Dämpfung gehört, daß der Flügel die lichte Weite des Kastens fast ganz ausfüllt, ohne jedoch daran zu streifen. Fig. 11 zeigt

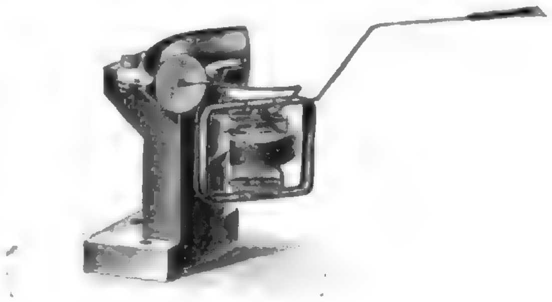


Fig. 11.

die an einem Lagerbock befestigte bewegliche Spule mit Dämpferkasten, Figur 12 den Aufbau des ganzen Instrumentes.

Zeiger und Skale sind genau so wie bei den Drehspulapparaten für Gleichstrom ausgebildet. Die Skale besitzt in der Regel

150 Teilstriche und ist von 0 bis 150 durchnumeriert.

Die Hauptstromspule ist, wenn sie für stärkere Ströme bestimmt ist, zur Vermeidung von Wirbelströmen nicht aus massivem Kupfer, sondern aus etwa 1 cm breiten dünnen Bändern zusammengesetzt. Die Bänder sind voneinander durch Papierlagen isoliert. Dies macht für Stromstärken bis zu 400 A. keine besonderen Schwierigkeiten. Leistungsmesser für mehr als 400 A. Hauptstrom pflegen nicht gebaut zu werden; für noch größere Ströme pflegt man Stromwandler (s. im Art. „Elektrische Arbeit" unter 10) anzuwenden. Man kann die Leistungsmesser für mehrere Strommeßbereiche bauen, indem man entweder sämtliche Windungen in Reihe schaltet, oder die Windungen in zwei Teile teilt, jede Hälfte für sich in Reihe schaltet und beide Hälften parallel legt, so daß jetzt die doppelte Stromstärke gegenüber der reinen Reihenschaltung angewandt werden kann. In Figur 13 sind HH die Hauptstromklemmen; wird in 1 ein Stöpsel gesteckt, so sind die beiden Hauptstromwickelungen in Reihe geschaltet; stecken die Stöpsel 2 und 3, so liegen die beiden Wickelungen einander parallel. Eine Firma (Weston Co.) fügt noch einen dritten Meßbereich für die vierfache Stromstärke hinzu, indem die Gesamtzahl aller Windungen in 4 Teile geteilt und in selbstverständlicher Weise zusammengeschaltet wird. Die Umschaltung erfolgt entweder durch Stöpsel oder besser durch Laschen. Sehr bequem sind Walzenschalter; sie müssen aber sehr sorgfältig ausgeführt sein und gepflegt werden, wenn sie auf die Dauer zuverlässig arbeiten sollen.

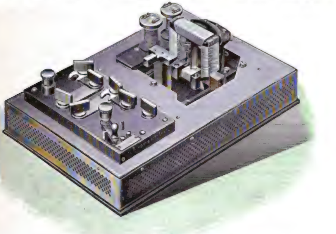


Fig. 12.

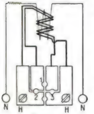


Fig. 13.

Ueber die Unzulässigkeit der Erhöhung der Strombereiche durch Nebenschlußwiderstände s. oben S. 256 unter c.

Die geometrische Form von Strom- und Spannungsspule bestimmt die Form der Skale. Während bei älteren Apparaten die Skale noch durchaus ungleichmäßig ist, sind jetzt Spulenformen gefunden, welche eine nahezu gleichmäßige, proportionale Skale hervorrufen.

Die Hauptstromspulen sind in der Regel derart konstruiert, daß sie bei Vollbelastung etwa 4 Watt verbrauchen. Der Spannungskreis kann mit 0,03 Ampere belastet werden. Also hat z. B. ein Leistungsmesser mit 150 Teilstrichen für 100 Ampere Höchststrom die dynamometrische Konstante

$$C = \frac{100 . 0{,}03}{150} = 0{,}02$$

Für eine Messung bei 600 Volt muß der Spannungskreis den Widerstand $r = 600/0{,}03$

Digitized by Google

= 20000 Ohm haben. Die Konstante des Leistungsmessers wird für diesen Meßbereich

$C_r = 400$

Die Vorschaltwiderstände müssen Induktions- und Kapazitätsfrei gewickelt werden, weil sonst der Korrektionswinkel δ nennenswerte Beträge erhalten kann. Für Spannungen bis zu einigen Tausend Volt macht das keine besonderen Schwierigkeiten; darüber hinaus bedarf es allerdings besonderer Konstruktionen, auf die hier nicht eingegangen zu werden braucht, weil man in der Regel Spannungswandler anwenden wird.

Die Angaben der Leistungsmesser sind in gewissen Grenzen von der Temperatur abhängig, was namentlich bei Apparaten, welche durch längere Dauereinschaltungen erwärmt sind, hervortritt. Diese Abhängigkeit hat ihren Grund einerseits in der Erhöhung des Widerstandes der Spannungsspule mit steigender Temperatur, andererseits in der Abnahme der Federkraft. Je kleiner der Temperaturkoeffizentenfreie Vorschaltwiderstand ist, um so größer ist der Einfluß. Er kann durch eine Parallelschaltung zur Spannungsspule kompensiert werden. Doch kann diese Kompensation streng genommen immer nur für e i n e n Spannungsmeßbereich gelten. In der Regel wird die Kompensation von den Firmen für den Meßbereich 150 Volt ausgeführt; sie genügt dann praktisch auch für alle h ö h e r e n Spannungen.

γ) Prüfung der Leistungsmesser. Bei der Gleichstromprüfung ist zu berücksichtigen, daß nicht nur das magnetische Feld der festen Spule, sondern auch das Erdfeld auf die bewegliche Spule wirkt. Man eliminiert diese Einwirkung, indem man die Messung wiederholt, nachdem die Stromrichtung in beiden Spulen umgedreht ist; dadurch hat sich die Wirkung der beiden Spulen a u f e i n a n d e r nicht geändert; die Kraft, die vom Erdfeld herrührt, hat aber die entgegengesetzte Richtung angenommen. Bei der Mittelbildung aus beiden Messungen fällt also der Einfluß des Erdfeldes heraus.

Außer dem Erdfeld macht sich natürlich auch jedes andere fremde Magnetfeld geltend, wie fremde Starkstromleitungen, eiserne Träger u. dgl.

Ein magnetisches Feld, das nicht durch Kommutieren beseitigt werden kann, ist das Feld der Hauptstromzuleitungen, das namentlich bei Leistungsmessern für große Stromstärken hervortritt. Man muß sich hier derart helfen, daß man die Eichung für eine ganz bestimmte Lage der Stromzuführungen ausführt und den Leistungsmesser nur bei dieser Lage der Stromzuführungen braucht. Letztere bilden somit gewissermaßen einen Teil der ablenkenden Hauptstromspulen. Es sind Apparate konstruiert worden, bei denen der Einfluß der magnetischen Fremdfelder dadurch beseitigt wird, daß man zwei Spannungsspulen an einer gemeinsamen Achse übereinander anordnet; die Windungsrichtung dieser Spulen ist entgegengesetzt (astatisches System). Diese Anordnung hat den Nachteil, daß der Apparat eine unbequeme Form erhält und das bewegliche System verhältnismäßig schwer wird.

Der Einfluß der Temperatur wird durch eine einstündige Dauereinschaltung mit voller Last festgestellt. Wirbelströme in umgebenden Metallteilen und in der Hauptstromspule selbst, sowie etwaige fehlerhafte Kurzschlüsse in einigen Windungen einer Spule werden am einfachsten erkannt, indem man eine Wechselspannung an den Spannungskreis legt, welche gegen den Hauptstrom um 90° in der Phase verschoben ist. Hat man einen Spannungsmeßbereich gewählt, in welchem die Selbstinduktion der Spannungsspule gegen den Widerstand des Spannungskreises zu vernachlässigen ist, so muß bei dem beschriebenen Versuch der Zeiger auf Null stehen bleiben.

Die Leistung in einem Drehstromsystem wird im allgemeinen durch zwei Leistungsmesser ausgeführt, die nach Fig. 14 geschaltet sind. Bei Phasenverschiebungen in der Belastung bis zu 60° sind die Angaben der Leistungsmesser zu addieren, bei Phasenverschiebungen über 60° von einander abzuziehen (vgl. Diagramm Fig. 6).

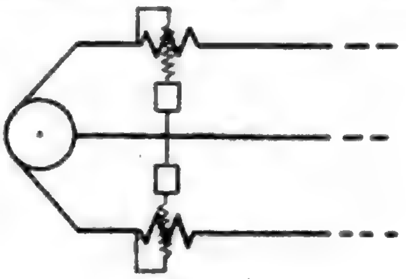


Fig. 14.

Siemens und Halske hat ein Wattmeter für Drehstrom konstruiert, bei welchem die beiden Dynamometer übereinander angeordnet sind, und die Spannungsspulen an derselben Achse befestigt sind, so daß die Angaben beider Systeme selbsttätig addiert werden. Eine Schwierigkeit entsteht insofern, als jede der Hauptstromspulen auch auf die nicht zugehörige Spannungsspule eine Kraft ausübt. Diese Wirkung kann dadurch kompensiert werden, daß die beiden Spannungskreise z. T. vereinigt werden, so daß sie in Form eines Sternes zusammengeschaltet sind.

δ) Elektrometrische Methode. Als Leistungsmesser nach der elektrometrischen Methode kommt nur das Quadrantelektrometer in Frage, und zwar, da die elektrostatischen Kräfte verhältnismäßig klein sind, in der Form als Spiegelinstrument (s. den Art. „Elektrostatische Messungen“).

Digitized by Google

Das Quadrantelektrometer (Fig. 15) besteht aus einer in vier Quadranten Q_1 bis Q_4 zerfallenden flachen Dose, in deren Innerem

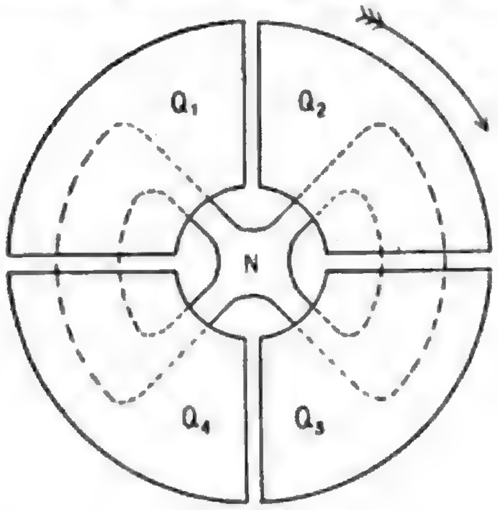


Fig. 15.

eine an einem Metallfaden aufgehängte biskuitförmige Nadel N schwebt. Die diagonal einander gegenüberliegenden Quadrantenpaare $Q_1 Q_3$ und $Q_2 Q_4$ sind metallisch miteinander verbunden. Das eine Quadrantenpaar habe das Potential v_1, das andere v_2, die Nadel das Potential v_0, so ist (wenn man von Unsymmetrieen und Kontaktpotentialen absieht), der Ausschlag α durch die Gleichung bestimmt.

$$C\alpha = (v_1 - v_2)\left(v_0 - \frac{1}{2}(v_1 + v_2)\right)$$

Die vollständige Formel enthält noch weitere Glieder, die aber bei richtigem Kommutieren herausfallen. Werden statt der Gleichspannungen Wechselspannungen angewandt, so ist auf der rechten Seite der zeitliche Mittelwert aus den Augenblickswerten der Spannungen einzusetzen.

Die Leistungsmessung erfolgt in der sogenannten Quadrantschaltung nach Fig. 16.

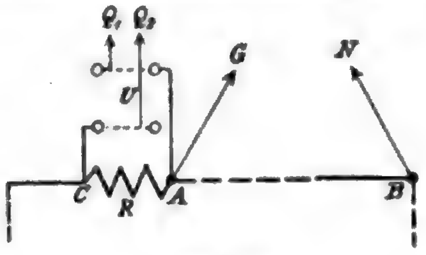


Fig. 16.

Zwischen den Punkten AB mag eine irgendwie geartete Belastung liegen, die Betriebsspannung E zwischen A und B sei von der Größe 60 bis 200 Volt; man schaltet vor den Stromkreis, dessen Verbrauch gemessen werden soll, einen induktionsfreien Normalwiderstand R, der so bemessen wird, daß an seinen Klemmen ein Spannungsabfall von 0,1 bis 1 Volt zustande kommt. Die Klemmen AC des Normalwiderstandes werden durch einen Umschalter U an die Quadrantenpaare Q_1 Q_2 des Elektrometers geführt, die Punkte B und A werden an Nadel N und Gehäuse G geführt. Ist α der Elektrometerausschlag, der beim Umwenden des Umschalters abgelesen wird, so wird

$$\text{Leistung} = M(ei) = \frac{C}{R}\,\alpha - \frac{1}{2}\,J^2R$$

Die Konstante C wird durch Gleichspannungsmessungen gefunden. Zwei Gleichspannungen G_1 und G_2 (Fig. 17) werden durch

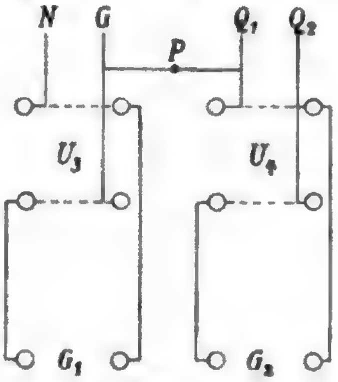


Fig. 17.

zwei Umschalter U_3 und U_4 mit Nadel und Gehäuse beziehungsweise mit den Quadrantenpaaren verbunden.

Es möge entsprechen den Umschalterstellungen

U_3	U_4	die Ablesung
‖	‖	β_1
‖	=	β_2
=	=	β_3
=	‖	β_4

Dann ist:

$$C = \frac{G_1 \quad G_2}{\frac{1}{2}(\beta_1 - \beta_2 + \beta_3 - \beta_4)}$$

Die Konstante C hängt, wenn nicht besondere Justierungen vorgenommen werden, in geringem Maße von der Größe der Spannung zwischen Nadel und Quadranten ab. Bei der Gleichstromeichung muß daher die Nadelspannung ebenso groß sein, wie die Effektivspannung bei der Wechselstrommessung

$$G_1 = E$$

Bei Spannungen über 200 Volt ist es nicht ratsam die volle Spannung an die Nadel zu legen, sondern durch einen Widerstand eine geeignete Teilung vorzunehmen. Man schließt die Betriebsspannung E durch einen großen Widerstand R_e und zweigt an dem Pol, an welchem der Normalwiderstand liegt, hinter einem Teilwiderstand r_e zur Nadel ab, so daß $E\frac{r_e}{R_e}$ zwischen Nadel und Gehäuse liegt. Die zu messende Leistung wird nach der Formel berechnet:

$$L = M(ei) = \frac{R_e}{r_e}\,\frac{C}{R_N}\,a + \frac{R_e - 2r_e}{2r_e}\,J^2R_N$$

Der Vorzug der elektrometrischen Methode liegt darin, daß man mit demselben Elektrometer unter Hinzufügung geeigneter Widerstände, die als Spannungsteiler dienen, und induktionsfreier Widerstände für den Betriebsstrom die verschiedenartigst zusammengesetzten Leistungen messen kann. Dabei ist es nicht schwer, die Empfindlichkeit so zu steigern, daß auch bei sehr großer Phasenverschiebung recht genaue Messungen gemacht werden können. Ein weiterer wesentlicher Vorteil besteht darin, daß das Elektrometer selbst keine Energie verzehrt; auf die Ladeströme, die auf das Elektrometer fließen, braucht man nur in den seltensten Fällen Rücksicht zu nehmen. Die elektrometrische Methode ist daher geeignet einzutreten, wo die dynamometrische versagt; als Beispiel sei die Messung von Energieverlusten in Dielektriken bei sehr hohen Spannungen genannt. Auf der anderen Seite muß hervorgehoben werden, daß das Spiegelelektrometer ein verhältnismäßig subtiler Apparat ist, so daß nur geübtere Hände mit ihm arbeiten können.

ε) Drehfeldmeßgeräte. Die bisher besprochenen Apparate haben den Vorteil, daß sie, mit Gleichstrom geprüft, ohne weiteres für Wechselstrom brauchbar sind. Demgegenüber haben sie den Nachteil, daß in ihnen die Kräfte auf die beweglichen Systeme nur verhältnismäßig klein sind. Für Schaltbrett-Montage- Registrierapparate empfiehlt es sich daher, ein anderes Meßprinzip zu verwenden, bei dem diese Kräfte erheblich größer sind.

Die Drehfeldmeßgeräte gehören zur Klasse der Induktionsapparate, die dadurch charakterisiert sind, daß die zur Ablenkung des beweglichen Systems notwendigen Ströme in diesem durch Induktion erzeugt werden. Dadurch ergibt sich für sie der Nachteil gegenüber dynamometrischen und elektrometrischen Apparaten, daß sie nur für Wechselstrom mit einem verhältnismäßig geringen Frequenzbereich richtige Angaben machen, während Gleichstrom überhaupt keinen Ausschlag hervorbringt.

Die Drehfeldmeßgeräte beruhen auf einem Prinzip, welches in dem Artikel „Elektrische Arbeit“ bei den Induktionszählern näher auseinandergesetzt ist.

An dieser Stelle seien als Typus nur die Drehfeldmeßgeräte der Siemens und Halske A.-G. beschrieben. Aus ringförmigen Blechen A (Fig. 18), welche vier Polansätze EEFF tragen, ist ein Eisenkörper aufgebaut. Die Polansätze EE tragen die Spannungsspulen, die Ansätze FF die Hauptstromspulen; vor den Polen dreht sich ein topfförmiger Aluminiumkörper. Im Innern des Aluminiumkörpers ist als Schluß des Eisenpfades ein zylindrischer, aus Eisenblechen aufgebauter Kern C angeordnet. Der ablenkenden Kraft auf die Aluminiumtrommel wird durch Spiralfedern das Gleichgewicht gehalten.

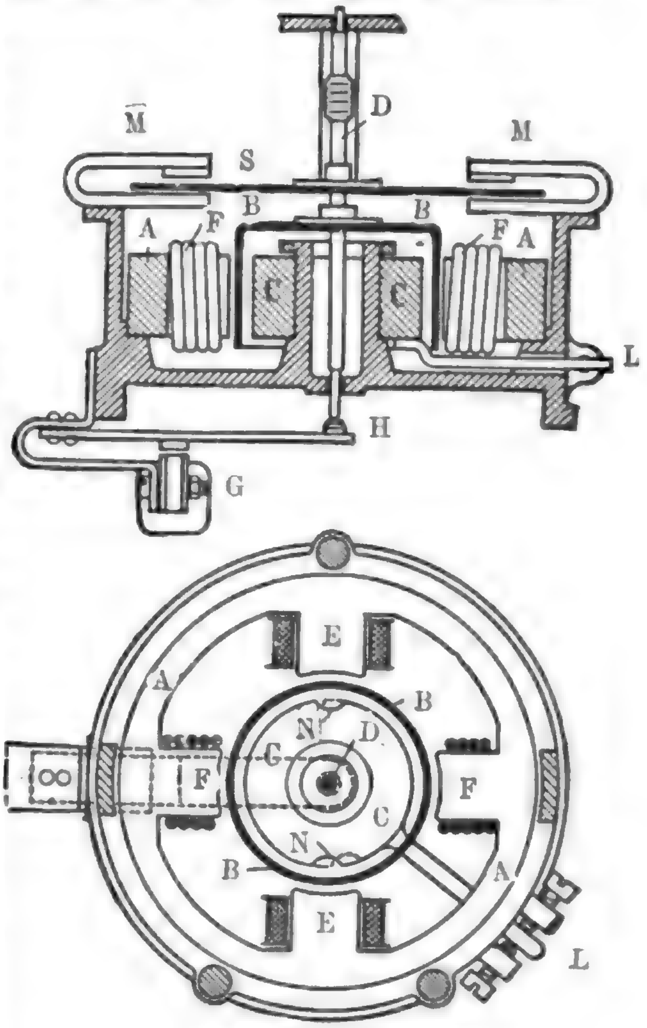


Fig. 18.

Die auf FF gewickelten Hauptstromspulen werden in den Arbeitsstrom direkt eingeschaltet.

Die auf E angeordneten Spannungsspulen befinden sich in einer „90°-Schaltung“, die in Fig. 19 schematisch dargestellt ist. Zwischen den Punkten AB befindet sich eine Stromverzweigung, wie sie bei Widerstandsmessungen mit der Wheatestoneschen Brücke angewandt zu werden pflegt. Die Zweige SS bestehen aus den beiden Spannungsspulen, während in RR und D induktionslose Widerstände eingeschaltet sind. Hinter diese Verzweigung ist eine kräftige Drosselspule geschaltet. P_1P_2 wird an die Betriebsspannung gelegt. Durch Verändern des Widerstandes D der im Gegensatz zur Verwendung der Wheatestoneschen Brücke mit Gleichstrom hier stets von Strom durchflossen ist, kann die Phase in SS geändert werden und zwar derart, daß das magnetische Feld in EE um 90° gegen die Betriebsspannung E an P_1P_2 verschoben ist.

Digitized by Google

Ueber die Verwendung von Meßwandlern (Transformatoren) zur Messung von Leistungen bei hohen Spannungen oder großen Betriebsströmen s. im Art. „Elektrische Arbeit" unter 10.

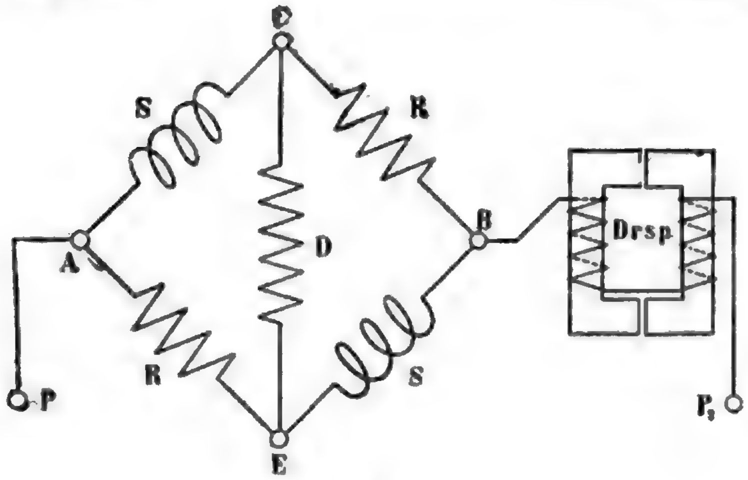


Fig. 19.

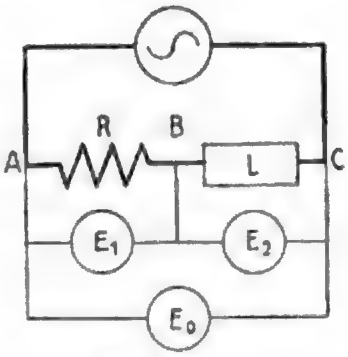


Fig. 20.

ζ) Drei-Spannungsmesser- und Drei-Strommessermethode. Die Leistung L, welche gemessen werden soll, liege zwischen den Punkten B und C, Fig. 20. Bei der Dreispannungsmessermethode schaltet man vor BC einen induktionsfreien Widerstand R zwischen die Punkte A und B und mißt die drei Spannungen (Effektivwerte)

E_0 zwischen A und C
E_1 „ A „ B
E_2 „ B „ C

Sind die Spannungsmesser stromverbrauchend, so dürfen sie während der Messung nicht aus der Anordnung entfernt werden oder müssen, wenn man es doch tun will, durch Widerstände gleicher Größe ersetzt werden, weil sonst Aenderungen der Spannungen und Phasen eintreten können. Diese Vorsichtsmaßregel ist bei der Anwendung des Elektrometers zur Spannungsmessung überflüssig. Das Diagramm (Fig. 21) läßt die Größe und Phase der drei Spannungen erkennen. Es ist zweckmäßig den Widerstand R so groß zu bemessen, daß nahezu $E_1 = E_2$ wird; dann ist die gesuchte Leistung

$$L = \frac{R + R_1}{2 R_1 R}(E_0^2 - E_1^2 - E_2^2) - \frac{E_2^2}{R_2}$$

Darin bedeuten R_1 und R_2 die Widerstände der Spannungsmesser.

Die Methode ist namentlich da brauchbar, wo der Betriebsstrom sehr klein ist und die Spannungen von einer für die Messung bequemen Größe sind.

Während die Dreispannungsmessermethode gelegentlich recht gute Dienste leisten kann, wo Leistungsmesser mit geeigneten Meßbereichen nicht zur Verfügung stehen, wird die Dreistrommessermethode nur in den seltensten Fällen angewandt werden. Sie besteht darin, daß man parallel zu dem Zweig, dessen Leistung L man bestimmen will, einen Abzweig legt und dessen Widerstand R so reguliert, daß die Stromstärken J_1 und

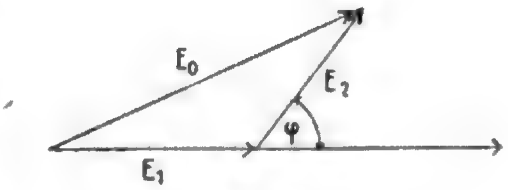


Fig. 21.

J_2 in den beiden einander parallel geschalteten Zweigen nahezu einander gleich sind. Außer den verzweigten Strömen J_1 und J_2 Fig. 22) mißt man auch den unverzweigten

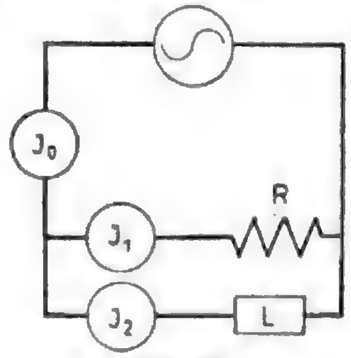


Fig. 22.

J_0. Die Leistung berechnet man aus der Formel:

$$L = \frac{R + R_1}{2}(J_0^2 - J_1^2 - J_2^2) - J_2^2 R_2$$

5. **Anwendungen.** Ein Gleichstrom J, welcher einen Leiter vom Widerstand r durchfließt, vollbringt eine Leistung vom Betrage $J^2 r$. Dieser Satz ist im allgemeinen auch für Wechselstrom richtig, selbst wenn der Stromleiter Induktivität besitzt. Dabei ist aber eins zu bedenken: haben die Leiter einen größeren Querschnitt, so finden auch in seinem Innern Induktionswirkungen statt, die zur Folge

Digitized by Google

haben, daß sich der Strom ungleichmäßig über den Querschnitt des Leiters verteilt. Handelt es sich um einen einzelnen geraden Draht, so werden die den Strom zusammensetzenden Stromfäden an die Peripherie gedrängt und zwar um stärker, je höher die Frequenz ist. Bei einer eisenlosen Spule ist die Stromdichte an den der Innenseite der Spule zugekehrten Teilen der Querschnitte größer, als an der Außenseite. In der Formel für die Leistung äußert sich diese Erscheinung dadurch, daß man für r nicht den Ohmischen Widerstand einzusetzen hat, sondern einen größeren, mit wachsender Frequenz steigenden Wert. In einzelnen wenigen Fällen ist diese Widerstandserhöhung berechenbar; experimentell wird sie so bestimmt, daß man mit einem Leistungsmesser die in dem Leiter verbrauchte Leistung L mißt und den den Leiter durchfließenden Strom J, dann ist

$$r_{\sim} = L/J^2$$

wo $r_{\sim}$ größer ist, als der mit Gleichstrom gemessene Widerstand r.

Noch wichtiger wird dies Verfahren, wenn der Wechselstrom eine Spule mit einem Eisenkern durchfließt. Das die Spule erfüllende Eisen wird ummagnetisiert und macht dafür einen gewissen Arbeitsaufwand erforderlich. Außerdem werden im Eisen, wenn es nicht schon fein unterteilt ist, Wirbelströme erzeugt, die ebenfalls die Zuführung einer gewissen Leistung erfordern. Man bestimmt in diesem Falle ebenso wie vorher: $r_{\sim} = L/J^2$ und nennt $r_{\sim}$ den Leistungswiderstand. Er ist natürlich erheblich größer, als der ohne Eisen gemessene $r_{\sim}$.

Zum Schluß sei noch auf die Apparate zur Erzeugung und Umwandlung elektrischer Energien eingegangen.

Generatoren (Dynamomaschinen) sind Apparate zur Umwandlung mechanischer in elektrische Energie.

Motoren solche, welche elektrische Energie in mechanische umsetzen.

Umformer sind rotierende Maschinen oder Maschinensätze, welche elektrische Energie in eine andere Form der elektrischen Energie umsetzen.

Transformatoren tun dasselbe, ohne bewegliche Teile zu besitzen.

Bei allen diesen Apparaten ist die Größe des Wirkungsgrades von besonderer praktischer Bedeutung. Man versteht darunter den Quotienten aus der abgegebenen Leistung zu der zugeführten Leistung. Die Grenzwerte des Wirkungsgrades sind also 0 und 1; 0 für eine gänzlich unbrauchbare Maschine, 1 für eine ideal arbeitende. Je besser die Maschine ist, um so schwieriger wird eine genaue Messung des Wirkungsgrades, da die zugeführte und abgegebene Leistung nahezu den gleichen Wert erhalten und sich daher bei der Berechnung der Differenz Meßfehler stark geltend machen. Das Prinzip der Erhaltung der Energie fordert, daß die Differenz zwischen zugeführter und abgegebener Energie gleich den Verlusten in den Maschinen beziehungsweise Umformern ist. Man kommt daher auch zu einer brauchbaren Bestimmung des Wirkungsgrades, wenn man nur die zugeführte oder nur die abgegebene Leistung mißt und außerdem die Verluste. Letztere bestehen aus Kupfer- und Eisenverlusten und bei rotierenden Maschinen aus den Reibungsverlusten. Die Messung des Wirkungsgrades durch Bestimmung der Verluste ist in der Praxis weit verbreitet.

Literatur. *F. Kohlrausch*, *Lehrbuch der praktischen Physik. 11. Aufl. Leipzig 1910.* — *Heinke, Kollert, Heinrich und Bercovitz*, *Handbuch der Elektrotechnik. Bd. 2, Abt. 4 u. 5. Leipzig 1908.* — *Kittler-Petersen*, *Allgemeine Elektrotechnik. Stuttgart 1909.* — *Brion*, *Leitfaden zum elektrotechnischen Praktikum. Leipzig 1910.* — *Orlich*, *Theorie der Wechselströme. Leipzig 1910.*

F. Orlich.

Elektrische Maßnormale.

1. Internationale Vereinbarungen. 2. Die elektrischen Maßnormalen im Deutschen Reich.

Unter elektrischen Maßnormalen verstehen wir diejenigen praktischen Einheiten, nach denen in der Wissenschaft und im Verkehrswesen die elektrischen Größen gemessen werden. In einigen Ländern sind diese Maßeinheiten durch gesetzliche Bestimmungen festgelegt.

1. Internationale Vereinbarungen. Wenn schon im internationalen Austausch wissenschaftlicher Ergebnisse ein einheitliches Maßsystem aus Bequemlichkeitsrücksichten von jeher als erstrebenswert galt, so forderte die rasche Entwickelung der Elektrotechnik gebieterisch die Regelung der elektrischen Maßnormalen für den internationalen Verkehr. So kam es, daß noch ehe die Landesgesetzgebungen sich mit der Frage befaßt hatten, Vertreter von Wissenschaft und Technik auf internationalen Kongressen über die zweckmäßigste Definition elektrischer Maßeinheiten und die Herstellung der sie darstellenden Maßnormalen berieten. Die auf dem internationalen Elektrikerkongreß zu Paris (1881), sowie auf der 1884 ebendahin berufenen Versammlung von Delegierten vieler Staaten vereinbarten Definitionen und Bezeichnungen der Maßeinheiten fanden denn auch in der wissenschaftlichen Terminologie und im industriellen

Digitized by Google

Verkehr Anwendung, auch ohne gesetzliche Regelung.

Die Definitionen der Pariser Kongresse für die elektrischen Maßeinheiten haben ihre Begründung im Gauß-Weberschen elektromagnetischen Maßsystem, dessen Einheiten cm, g, sec sind. Da die gewöhnlich vorkommenden Beträge der Widerstände und Spannungen in diesen Einheiten sich durch Zahlen ausdrücken, die bald vor, bald hinter dem Komma eine unübersehbare Zahl von Nullen enthalten, so wählte man auf den Pariser Kongressen für Länge, Masse, Zeit folgende Einheiten:

Längeneinheit: 10^9 cm (annähernd = der Länge des Erdmeridianquadranten).
Masseneinheit: 10^{-11} g.
Zeiteinheit: die Sekunde.

Die nach diesen Einheiten definierten elektromagnetischen Maße für Widerstand, Strom und Spannung nannte man Ohm, Ampere und Volt. Danach war also

$$1 \text{ Ohm} = 10^9 \left[\frac{\text{cm}}{\text{sec}}\right],$$

$$1 \text{ Ampere} = 0{,}1 \left[\frac{\text{cm}^{\frac{1}{2}}\,\text{g}^{\frac{1}{2}}}{\text{sec}}\right]$$

$$1 \text{ Volt} = 10^8 \left[\frac{\text{cm}^{\frac{3}{2}}\,\text{g}^{\frac{1}{2}}}{\text{sec}^2}\right]$$

An diesen theoretischen Definitionen des Ohm, Ampere, Volt ist niemals etwas geändert worden.

Da sich indessen diese „absoluten" Maßeinheiten nur durch sogenannte absolute Messungen, die damals noch einen sehr geringen Genauigkeitsgrad erreicht hatten, verwirklichen ließen, so beschloß man 1884 auf dem Pariser Kongreß, das Ohm durch sein Verhältnis zu der viel genauer bestimmbaren Siemensschen Quecksilbereinheit (Widerstand einer Quecksilbersäule von 1 m Länge, 1 mm^2 Querschnitt und von der Temperatur 0° C) zu definieren. Der Beschluß, das „legale Ohm" gleich 1,06 Siemenseinheiten zu setzen, entsprach der damaligen experimentellen Kenntnis über das Verhältnis des absoluten Ohm zur Siemenseinheit und wurde, nachdem die Versuche erster Forscher für dieses Verhältnis genauere Zahlen geliefert hatten, auf dem internationalen Kongreß zu Chicago (1893) dahin umgeändert, daß 1 internationales Ohm = 1,063 Siemenseinheiten sein solle. Ferner wurde in Chicago als internationales Ampere diejenige konstante Stromstärke festgesetzt, welche beim Durchgang durch eine wässerige Lösung von Silbernitrat in einer Sekunde 0,001118 g Silber niederschlägt. In Paris war man über die theoretische Definition des Ampere nicht hinausgegangen.

Durch die Festsetzung von internationalem Ohm und internationalem Ampere sind sämtliche elektrischen Normalmaße völlig bestimmt. Z. B. ist das internationale Volt durch das Ohmsche Gesetz als diejenige Spannungsdifferenz bestimmt, welche an den Enden eines Widerstandes von 1 internationalen Ohm herrscht, der von 1 internationalen Ampere durchflossen wird. Es ist also nicht etwa zulässig, außer den beiden Grundeinheiten internationales Ohm und internationales Ampere auch das internationale Volt durch die Spannung eines bestimmten Normalelements zu definieren, wie dies auf dem Kongreß zu Chicago 1893 geschehen war. Es hatte sich bald nach der Konferenz herausgestellt, daß die dort durch das Clarksche Element zahlenmäßig festgelegte Definition des Volt um etwa 0,1% von derjenigen abwich, welche sich aus dem Produkt internationales Ohm mal internationales Ampere ergibt.

Dieser Fehler der Chicagoer Konferenz wurde erst durch die internationalen Konferenzen über elektrische Einheiten und Normale zu Berlin (Oktober 1905) und zu London (Oktober 1908) wieder völlig beseitigt, indem man beschloß, als Grundeinheiten nur internationales Ohm und internationales Ampere zahlenmäßig festzulegen. An der Londoner Konferenz nahmen 46 Delegierte der folgenden 22 Länder und 4 englischen Besitzungen teil: Vereinigte Staaten von Amerika, Belgien, Brasilien, Chile, Columbia, Dänemark und Schweden, Deutschland, Ecuador, England, Frankreich, Guatemala, Italien, Japan, Mexiko, Niederlande, Paraguay, Oesterreich, Rußland, Spanien, Schweiz, Ungarn, Australien, Kanada, Indien und Kronkolonien.

Es ist zu erwarten, daß auch die gesetzlichen Bestimmungen dieser Länder, soweit dies noch nicht geschehen ist, den Beschlüssen der Londoner Konferenz folgen werden. Im Deutschen Reich sind bereits durch ein am 1. Juni 1898 erlassenes Gesetz nur Ohm und Ampere als Grundeinheiten festgelegt. Dem Beispiele Deutschlands sind Oesterreich (1900) und Belgien (1903) gefolgt, während die Vereinigten Staaten von Amerika (1893), England (1894) und Frankreich (1896) in Anlehnung an die Chicagoer Beschlüsse auch das internationale Volt durch die elektromotorische Kraft des Clarkelements definiert hatten. In diesen Ländern müssen demnach die gesetzlichen Bestimmungen nach den Londoner Beschlüssen (1908) geändert werden.

2. Die elektrischen Maßnormale im Deutschen Reich. In Uebereinstimmung mit den internationalen Vereinbarungen be-

Digitized by Google

stimmt das im Deutschen Reich am 1. Juni 1898 erlassene „Gesetz, betreffend die elektrischen Maßeinheiten“ folgendes:

„§ 1. Die gesetzlichen Einheiten für elektrische Messungen sind das Ohm, das Ampere und das Volt.

§ 2. Das Ohm ist die Einheit des elektrischen Widerstandes. Es wird dargestellt durch den Widerstand einer Quecksilbersäule von der Temperatur des schmelzenden Eises, deren Länge bei durchweg gleichem, einem Quadratmillimeter gleich zu achtendem Querschnitt 106,3 cm und deren Masse 14,4521 g beträgt.

§ 3. Das Ampere ist die Einheit der elektrischen Stromstärke. Es wird dargestellt durch den unveränderlichen elektrischen Strom, welcher bei dem Durchgange durch eine wässerige Lösung von Silbernitrat in einer Sekunde 0,001118 g Silber niederschlägt.

§ 4. Das Volt ist die Einheit der elektromotorischen Kraft. Es wird dargestellt durch die elektromotorische Kraft, welche in einem Leiter, dessen Widerstand ein Ohm beträgt, einen elektrischen Strom von einem Ampere erzeugt.“

Es ist die Aufgabe der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt, die oben definierten Einheiten für das Deutsche Reich praktisch zu verwirklichen und elektrische Meßgeräte, die ihr zur amtlichen Prüfung und Beglaubigung übergeben werden, in den gesetzlichen Einheiten zu prüfen. Deshalb bestimmt das Gesetz in

„§ 7. Die Physikalisch-Technische Reichsanstalt hat Quecksilbernormale des Ohm herzustellen und für deren Kontrolle und sichere Aufbewahrung an verschiedenen Orten zu sorgen.“

Die Quecksilbernormale werden dargestellt durch Glasrohre von genau bekannter Länge und genau bekanntem Querschnitt, deren Enden in kugelförmige Gefäße einmünden. Die Rohre werden im Vakuum mit destilliertem und elektrolytisch gereinigtem Quecksilber gefüllt. Der elektrische Widerstand der Füllungen läßt sich dann der Definition des internationalen Ohm entsprechend durch einfache Umrechnung in dieser Einheit ausdrücken. Der Ausbreitungswiderstand an jedem Ende wird dabei so gerechnet, als ob der Quecksilberzylinder um das 0,80-fache seines Radius länger wäre. Da die Herstellung und Ausmessung der Rohre mit großen Mühen verbunden ist, werden in der Reichsanstalt als Gebrauchsnormale eine Anzahl von Drahtwiderständen aus Manganin (Normalbüchsen von 1 internationalen Ohm) benutzt, die häufig untereinander und von Zeit zu Zeit mit den Quecksilbernormalen verglichen werden. Auf diesen Normalbüchsen von 1 Ohm wird jährlich eine Widerstandsskala durch Vergleichsmessungen aufgebaut, die aus Büchsenwiderständen von 100 000 Ohm bis zu 0,0001 Ohm besteht. Es hat sich gezeigt, daß die Drahtnormalen aus Manganin eine große zeitliche Konstanz besitzen.

Die Bedingungen, unter denen bei der Darstellung des internationalen Ampere die Abscheidung des Silbers stattzufinden hat, sind nach den Ausführungsbestimmungen des oben erwähnten Gesetzes (siehe Reichsgesetzblatt 1901 Nr. 16) die folgenden:

„Die Flüssigkeit soll eine Lösung von 20 bis 40 Gewichtsteilen reinen Silbernitrats in 100 Teilen chlorfreien destillierten Wassers sein; sie darf nur so lange benutzt werden, bis im ganzen 3 g Silber auf 100 ccm der Lösung elektrolytisch abgeschieden sind.

Die Anode soll, soweit sie in die Flüssigkeit eintaucht, aus reinem Silber bestehen. Die Kathode soll aus Platin bestehen. Uebersteigt die auf ihr abgeschiedene Menge Silber 0,1 g auf das Quadratzentimeter, so ist das Silber zu entfernen.

Die Stromdichte soll an der Anode ein Fünftel, an der Kathode ein Fünfzigstel Ampere auf das Quadratzentimeter nicht überschreiten.

Vor der Wägung ist die Kathode zunächst mit chlorfreiem destilliertem Wasser zu spülen, bis das Waschwasser bei dem Zusatz eines Tropfens Salzsäure keine Trübung zeigt, alsdann 10 Minuten lang mit destilliertem Wasser von 70° bis 90° auszulaugen und schließlich mit destilliertem Wasser zu spülen. Das letzte Waschwasser darf kalt durch Salzsäure nicht getrübt werden. Die Kathode wird warm getrocknet, bis zur Wägung im Trockengefäß aufbewahrt, und nicht früher als 10 Minuten nach der Abkühlung gewogen.“

Die praktische Verwirklichung der Stromeinheit mittels des Silbervoltameters erfordert also einen erheblichen experimentellen Aufwand und mannigfache Erfahrung. Es ist deshalb auch hier wünschenswert, Gebrauchsnormale zu besitzen, mittels deren eine Strommessung bequem und doch genau ausgeführt werden kann. Das beste Gebrauchsnormal hätte man in einem zeitlich unveränderlichen Normalelement, dessen elektromotorische Kraft durch silbervoltametrische Messungen in internationalen Volt geeicht worden ist. Den Bemühungen der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt, des National Physical Laboratory in Teddington und des Bureau of Standards in Washington ist es gelungen, das Westonsche Normalelement mit stets gesättigter Cadmiumsulfatlösung so genau reproduzierbar und zeitlich konstant zu konstruieren, daß ein großer Stamm solcher Elemente, bei konstanter Temperatur aufbewahrt, ein ziemlich konstantes Spannungsnormal darstellt,

Digitized by Google

welches nur selten an das Silbervoltameter angeschlossen zu werden braucht. Auf Grund der neueren Anschlußmessungen kann man für die in London 1908 international angenommene Form des Westonschen Normalelements mit stets gesättigter Lösung die elektromotorische Kraft zu 1,0183 Volt bei 20° annehmen.

Die übrigen elektrischen Einheiten für Elektrizitätsmenge, Leistung, Arbeit, Kapazität und Induktionskoeffizient werden durch die Ausführungsbestimmungen zum Gesetz vom 1. Juni 1898 und in Uebereinstimmung mit internationalen Vereinbarungen wie folgt definiert und bezeichnet:

„Die Elektrizitätsmenge, welche bei einem Ampere in einer Sekunde durch den Querschnitt der Leitung fließt, heißt eine Amperesekunde (Coulomb), die in einer Stunde hindurchfließende Elektrizitätsmenge heißt eine Amperestunde.

Die Leistung eines Ampere in einem Leiter von einem Volt Endspannung heißt ein Watt.

Die Arbeit von einem Watt während einer Stunde heißt eine Wattstunde.

Die Kapazität eines Kondensators, welcher durch eine Amperesekunde auf ein Volt geladen wird, heißt ein Farad.

Der Induktionskoeffizient eines Leiters, in welchem ein Volt induziert wird durch die gleichmäßige Aenderung der Stromstärke um ein Ampere in der Sekunde, heißt ein Henry."

Alle diese Einheiten lassen sich ihrer Definition gemäß auf internationales Ohm, internationales Ampere und Sekunde zurückführen. Die Messungen, durch welche dies geschieht, heißen auch „absolute" Messungen. Sie sind in der Regel mühsamer als relative Messungen, bei denen nur zwei gleichartige Größen verglichen werden. Es ist deshalb üblich, für solche Vergleiche Gebrauchsnormale herzustellen, welche die Einheit selbst oder einen Teil oder ein Vielfaches derselben darstellen und nur von Zeit zu Zeit „absolut" gemessen zu werden brauchen.

Für die Vielfachen und Teile der elektrischen Einheiten gelten folgende Bezeichnungen. Als Vorsätze vor dem Namen einer Einheit bedeuten:

Kilo	das Tausendfache,
Mega (Meg)	das Millionfache,
Milli	den tausendten Teil,
Mikro (Mikr)	den millionten Teil.

Literatur. *Reichsgesetzblatt 1898, S. 905 und 1901, Nr. 16. — Internationaler Entwurf für die staatlichen Laboratorien im Verbatim Report d. Intern. Konferenz London 1908; Bericht hierüber:* **W. Jaeger und St. Lindeck,** *E. T. Z. 1909, Heft 15. — Internationaler Wert der elektromotorischen Kraft des Weston-Normalelements E. T. Z. 1910, S. 1303. — Weitere Literatur z. B. bei* **W. Jaeger und St. Lindeck,** *Zeitschr. f. Instrumentenkunde 1906, S. 15: Ueber die Konstanz von Normalwiderständen aus Manganin. —* **E. Giebe,** *ebenda, 1909, S. 269 und 1911, S. 6: Normalkondensatoren und ihre absolute Messung; Präzisionsmessungen an Selbstinduktionsnormalen.*

E. Grüneisen.

Elektrische Maßsysteme.

1. Zweck der Maßsysteme. 2. Mechanische Maßsysteme: a) Dimension. b) Diagramm. c) „Absolutes" und „technisches" Maß. 3. Die willkürlichen Konstanten: a) Beziehungen zwischen elektrischen und mechanischen Größen. b) Beziehungen zwischen magnetischen und mechanischen Größen. c) Beziehungen zwischen elektrischen und magnetischen Größen. 4. Die gebräuchlichen Maßsysteme: a) Absolute elektrostatische Einheiten für die elektrischen Größen. b) Absolute magnetostatische Einheiten für die magnetischen Größen. c) Absolute elektromagnetische Einheiten für die elektrischen Größen. d) Kombinationen. e) „Praktisches" Maßsystem. f) „Absolute" cgs-Einheiten in „praktischem" Maß. 5. Mängel der gebräuchlichen Maßsysteme: a) Stellung des Faktors 4π. b) Stellung des Faktors c_0. c) Größenordnung der Einheiten.

1. Zweck der Maßsysteme. In den ersten Zeiten elektrischer Messungen benutzte man als Vergleichseinheiten willkürliche Etalons, die gerade vorhanden waren oder die sich leicht und zuverlässig herstellen ließen, z. B. die elektromotorische Kraft des Daniellschen Elementes als Spannungseinheit oder den Widerstand des Siemensschen Quecksilbernormals (1860) als Widerstandseinheit. (Für die Lichtstärke hat man heute noch eine solche willkürliche Einheit: die Lichtstärke der Hefnerlampe.) Wenn man auf diese Weise für jede elektrische und jede magnetische Größe eine Zufallseinheit benutzen wollte, so würden die Formeln der Elektrizitätslehre mit einer großen Zahl von Proportionalitätsfaktoren belastet werden. Um dies zu vermeiden, verfuhr man nach dem Grundsatz, für möglichst wenige elektrische Größen die Einheiten willkürlich zu wählen und für die übrigen so, daß in den Gleichungen keine Proportionalitätsfaktoren auftreten, anders ausgedrückt: daß die Proportionalitätsfaktoren = 1 werden. Dann gelten z. B. die Gleichungen

$$\text{Widerstand} \times \text{Strom} = \text{Spannung},$$
$$\text{Kapazität} \times \text{Spannung} = \text{Ladung}.$$

Das war der erste Schritt zu einem Maßsystem. Bei der Einführung der heute geltenden Maßsysteme verfolgte man aber noch einen andern Zweck: Man wollte sich über-

Digitized by Google

haupt von willkürlichen elektrischen Einheiten freimachen und alle elektrischen und magnetischen Größen mechanisch definieren, also aus den Einheiten für Länge, Zeit, Kraft ableiten (Gauß 1833). Z. B. sollte als Einheit die Elektrizitätsmenge gelten, die auf eine gleich große im Abstand Eins mit der Kraft Eins wirkt. Dadurch hoffte man nicht nur die Formeln von willkürlichen Koeffizienten zu befreien und die numerische Rechnung bequem zu machen, sondern auch die größte Zuverlässigkeit und Genauigkeit in die Zahlenangaben über elektromagnetische Größen zu bringen. Diese Ansicht entsprach dem damaligen Stande der Meßkunst (1852). Man begann nun (British Association 1861) Etalons zu konstruieren, die den mechanisch definierten idealen Einheiten möglichst nahe kämen, und wo dies nicht möglich war, die Zahlen, die die Werte für irgendwelche willkürlichen Etalons durch die idealen Einheiten ausdrücken, durch Messung möglichst genau zu finden. Dabei stellte sich heraus, daß es viel leichter ist, beständige und bequem reproduzierbare Etalons für die elektrischen Größen zu konstruieren, als die elektrischen Größen auf mechanische zurückzuführen. Deshalb hat man die ursprüngliche Absicht, die elektrischen Einheiten auf mechanische zurückzuführen, fallen lassen und zieht es gegenwärtig (seit 1884 und 1898) vor, die elektrischen Einheiten in Strenge rein elektrisch zu definieren und darzustellen. Diese elektrisch definierten Einheiten sind aber so gewählt, daß sie den ursprünglich angestrebten mechanisch definierten sehr nahe kommen. Die Abweichungen liegen an der Grenze der heut erreichten Meßgenauigkeit, sind also zum Teil gar nicht mit Sicherheit angebbar. Aber selbst wenn sich solche Abweichungen angeben lassen, ändert man darum doch nicht die elektrische Definition der Einheit, ebensowenig, wie man nach jeder neuen Messung des Erdquadranten das Meter ändert oder nach jeder neuen Messung der Dichte des Wassers das Gramm. Für die gewöhnlichen Messungen und Rechnungen können jene kleinen Abweichungen unberücksichtigt bleiben. Wo es aber einmal auf eine ungewöhnlich große Genauigkeit ankommt, muß beim Uebergang vom elektrischen auf mechanisches Maß ein (sehr nahe bei 1 gelegener) Korrektionsfaktor eingeführt werden. Vom Standpunkt der Präzisionsmeßkunst beurteilt, haben sich also die sogenannten absoluten Maßsysteme überlebt. Für den Theoretiker und für den praktischen Rechner bestehen aber ihre Vorteile unvermindert fort — aber auch ihre Nachteile. Die Aufgabe der Maßsysteme ist demnach, für vorhandene Normale die Zahlenwerte mit beschränkter Genauigkeit so festzusetzen, daß die Formeln und die numerischen Rechnungen einfach und bequem werden und daß die unvermeidlichen Konstanten den ihnen logisch zukommenden Platz erhalten.

Der Kürze des Ausdrucks wegen werden wir im folgenden eine Redeweise benutzen, als ob es sich noch um eine eigentliche, d. h. streng genaue Zurückführung auf mechanisches Maß handelte.

Selbstverständlich folgt aus dem Gesagten nicht, daß „absolute" Messungen nutzlos und überflüssig seien. Nur erscheint die Aufgabe in einem andern Gewande: Experimentell die Konstanten zu bestimmen, die in den Beziehungen zwischen mechanisch gemessenen mechanischen Größen, nach elektrisch definierten Einheiten gemessenen elektrischen Größen und nach magnetisch definierten Einheiten gemessenen magnetischen Größen auftreten.

2. Mechanische Maßsysteme. 2a) Dimension. Systematische Einheiten benutzt man schon in der Kinematik und in der Mechanik. Da die elektrischen und die magnetischen Maßsysteme an sie anknüpfen, schicken wir über die mechanischen Einheiten das Nötige voraus.

In der Kinematik sind die Einheiten, die man willkürlich wählt („Grundeinheiten"), die für Länge und Zeit. In der Mechanik kommt noch eine weitere hinzu. Als solche wählt man meist die für die Masse oder die für die Kraft. Alle übrigen Einheiten (die „abgeleiteten") entstehen durch gewisse Vorschriften, z. B.: Als Einheit gilt die Geschwindigkeit, bei der in der Zeiteinheit ein Weg gleich der Längeneinheit zurückgelegt wird. Oder: Als Einheit gilt die Kraft, die der Masse Eins die Beschleunigung Eins erteilt usw. Hält man an diesen Vorschriften fest und ändert die Grundeinheiten, so ändern sich auch die abgeleiteten Einheiten. Die Ausdrücke, die angeben, wieviel mal so groß eine abgeleitete Einheit wird, nennt man ihre Dimension (Fourier). Macht man die Längeneinheit $\mathbf{L}$-mal so groß, die Zeiteinheit $\mathbf{T}$-mal so groß und die Masseneinheit $\mathbf{M}$-mal so groß, so wird z. B. die Leistungseinheit $\mathbf{ML^2/T^3} = \mathbf{ML^2T^{-3}}$ mal so groß. Der Ausdruck $\mathbf{ML^2T^{-3}}$ ist also die Dimension der Leistungseinheit oder kurz der Leistung L. Das drückt man gewöhnlich kurz so aus (Maxwell):

$$[L] = \mathbf{ML^2T^{-3}}.$$

2b) Diagramm. Hat eine beliebige mechanische Größe X die Dimension $[X] = \mathbf{M^aL^bT^c}$, so folgt durch Logarithmieren $\log[X] = a\log\mathbf{M} + b\log\mathbf{L} + c\log\mathbf{T}$. Diese Beziehung kann man benutzen, um sich durch ein Diagramm eine bequeme Uebersicht über das Größenverhältnis der verschiednen Einheiten zu verschaffen, indem man etwa $\log\mathbf{L}$

Digitized by Google

als Abszisse und log **M** als Ordinate aufträgt. Eine Veränderung der Zeiteinheit braucht nicht in Betracht gezogen zu werden, da fast in allen Maßsystemen dieselbe Zeiteinheit benutzt wird: die Sekunde. Einheiten, die sich wie 1:10:100 verhalten, werden hierbei durch Strecken dargestellt, die sich wie k:(k + 1):(k + 2) verhalten (k eine Konstante). Figur 1 zeigt ein solches Diagramm der mechanischen Einheiten. Jeder Größenart entspricht eine gewisse Richtung oder Parallelenschar (Tangens des Neigungswinkels gegen die Abszissenachse = — b/a), jeder Größe („Einheit") eine bestimmte Gerade, jedem Maßsystem ein bestimmter Punkt. Die Einheiten dieses Systems werden durch die Geraden dargestellt, die durch diesen Punkt gehen. Der Abstand zweier paralleler Geraden ist ein Maß für den Logarithmus des Verhältnisses der beiden Größen, die durch diese Geraden dargestellt werden. An jede Gerade ist die durch sie dargestellte Einheit angeschrieben.

2c) „Absolutes" und „technisches" Maß. In der Physik werden als Grundeinheiten Gramm, Zentimeter, Sekunde benutzt (Vorschlag der British Association 1869). Dieses sogenannte cgs-System wird im Diagramm durch den Schnittpunkt der horizontalen Grammlinie mit der vertikalen Zentimeterlinie dargestellt. Die zugehörige Krafteinheit heißt „Dyn", die zugehörige Arbeitseinheit „Erg". Das Dyn ist ungefähr gleich der Kraft, mit der ein Milligrammgewicht auf seine Unterlage drückt.

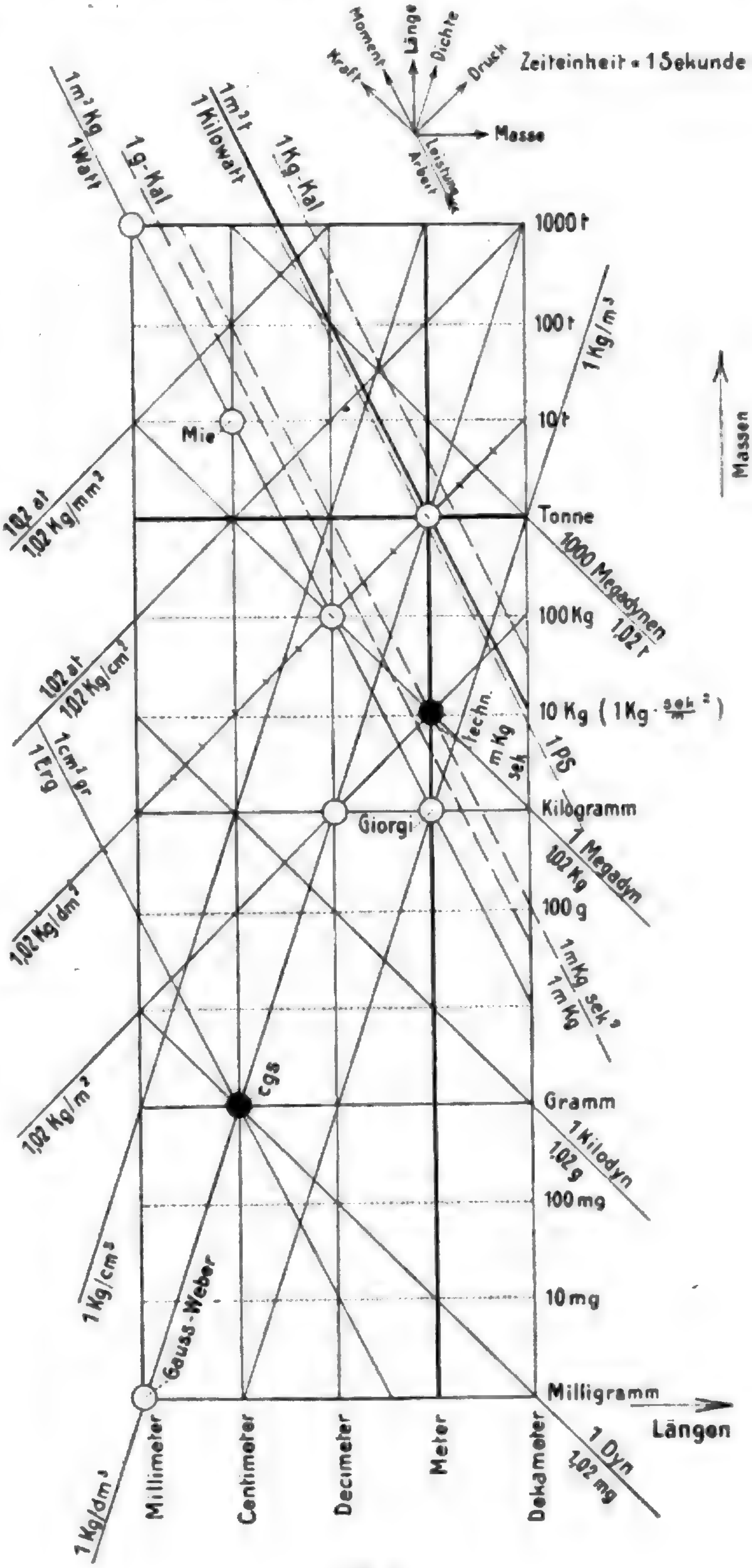


Fig. 1.

Digitized by Google

Ein Maßsystem, das als dritte Grundgröße die Masse benutzt, wird ein „absolutes“ genannt. In der Bau- und Maschinentechnik benutzt man ein Maßsystem, in dem als dritte Grundgröße die Kraft gilt („technisches“ Maßsystem). Im absoluten Maß hat die Kraft die Dimension $[K] = \mathbf{MLT^{-2}}$. Hat eine Größe im absoluten Maß die Dimension $\mathbf{M^x L^y T^z}$, so ist daher ihre Dimension im technischen Maß $\mathbf{K^x L^{y-x} T^{z+2x}}$. Ist umgekehrt die technische Dimension $\mathbf{K^u L^v T^w}$, so ist die absolute Dimension $\mathbf{M^u L^{u+v} T^{w-2u}}$. Für einige Größen zeigt die folgende Tafel die Dimensionen in den beiden Maßsystemarten:

Masse	$\mathbf{M}$	$\mathbf{KL^{-1}T^2}$
Bewegungsgröße	$\mathbf{MLT^{-1}}$	$\mathbf{KT}$
Kraft	$\mathbf{MLT^{-2}}$	$\mathbf{K}$
Trägheitsmoment	$\mathbf{ML^2}$	$\mathbf{KLT^2}$
Drehimpuls	$\mathbf{ML^2T^{-1}}$	$\mathbf{KLT}$
Arbeit	$\mathbf{ML^2T^{-2}}$	$\mathbf{KL}$
Leistung	$\mathbf{ML^2T^{-3}}$	$\mathbf{KLT^{-1}}$

In dem technischen Maßsystem werden als Grundeinheiten benutzt: Sekunde, Meter und die Kraft, mit der ein Kilogrammgewicht auf seine Unterlage drückt (Kraft-Kilogramm = kg*). Die zugehörige Masseneinheit kg*sek²/m ist die Masse, der die Kilogrammkraft (nicht die Schwerkraft!) die Beschleunigung 1 m/sek² erteilt. Das ist ungefähr die Masse von einem 10 kg-Gewicht oder von 10 Litern Wasser (genauer: 9,81). Das „technische“ m-kg*-sek-System läßt sich daher auch auffassen als ein „absolutes“ m-9,81 kg-sek-System. 1 kg* sek²/m = 9,81 kg; 1 kg*m = $0{,}981 . 10^8$ Erg $\approx 10^8$ Erg; 75 kg*m/sek = 1 Pferdestärke; 100 kg*m/sek = 1 Poncelet; 102 kg*m/sek = 1 Kilowatt. Im Diagramm wird das technische Maßsystem durch einen Punkt dargestellt, der dicht unter dem Schnittpunkt der horizontalen 10-kg-Linie und der vertikalen Meterlinie liegt.

In den Formeln, die für Rechnung nach „technischem“ Maß eingerichtet sind, tritt die Erdbeschleunigung g = 9,81 m/sek² gerade da auf, wo die Schwere nicht wirkt, und fehlt gerade dann, wenn sie wirkt. Z. B. ist in einem Schwungring vom Gewicht G und der Umfangsgeschwindigkeit v die kinetische Energie $\frac{1}{2}$ Gv²/g aufgespeichert. Ein Kran, der eine Last vom Gewicht G auf die Höhe h hebt, leistet die Arbeit Gh. Die Größe g hat also bei Rechnungen nach technischem Maß nicht den ihr logisch zukommenden Platz.

3. Die willkürlichen Konstanten. 3a) Beziehungen zwischen elektrischen und mechanischen Größen. Bringen wir zwischen die Platten eines geladenen Plattenkondensators eine isoliert aufgehängte geladene Kugel („Probekugel“), so wirkt auf diese eine Kraft E und zwar überall dieselbe (homogenes Feld). Wir nennen E die Stärke des elektrischen Feldes zwischen den Platten (vgl. den Artikel „Elektrisches Feld“). Wenn die Probekugel stärker geladen wird, wird auch die Kraft auf sie größer. Wir haben daher die Feldstärke nur in einer willkürlichen und noch unbekannten Einheit ermittelt. Nun ziehen sich aber auch die beiden Platten an und zwar mit einer Kraft, die wie das Quadrat der Feldstärke wächst, und außerdem mit der Plattengröße (-Fläche) f. Bezeichnen wir mit $\Delta/2$ einen Proportionalitätsfaktor, so haben wir also für die Kraft den Ausdruck $K = \frac{\Delta}{2} E^2 f$. Ist die Kraft K gemessen, so finden wir $\Delta = \frac{2K}{E^2 f}$. Bringen wir zwischen die Platten verschiedene Flüssigkeiten (Petroleum, Oel usw.) und benutzen immer dieselbe Probekugel zur Bestimmung von E, so ergeben sich für Δ verschiedene Werte. Die Größe Δ ist also eine Materialkonstante, die aber auch für den leeren Raum einen bestimmten Wert Δ_0 hat. Man nennt das Verhältnis $\varepsilon = \Delta/\Delta_0$ die Dielektrizitätskonstante des Materials (vgl. den Artikel „Dielektrizität“). Wir wollen ε die relative (nämlich auf Vakuum oder, was praktisch dasselbe ist, auf Luft bezogene) und Δ die absolute Dielektrizitätskonstante nennen. Schreiben wir aber umgekehrt für Δ_0 den Zahlenwert vor, so folgt aus der Anziehungskraft der beiden Platten ein ganz bestimmter Wert für die Feldstärke E, nämlich $E = \sqrt{\frac{2K}{\Delta f}}$, also auch eine bestimmte Einheit für die elektrische Feldstärke.

Zugleich ist eine bestimmte Einheit für die Dielektrizitätskonstante festgesetzt. Die Dielektrizitätskonstante Eins hat nämlich ein (hypothetischer) Körper, dessen Dielektrizitätskonstante Δ_0 mal so klein ist, wie die der Luft. Als eine Einheit der Dielektrizitätskonstante werden wir z. B. das Farad/cm kennen lernen. Dieses ist $1{,}131 . 10^{12}$ mal so groß, wie die Dielektrizitätskonstante der Luft. Folglich beträgt diese

$$\Delta_0 = 0{,}884 . 10^{-12} \frac{\text{Farad}}{\text{cm}}.$$

Hat man ein bestimmtes mechanisches Maßsystem zugrunde gelegt, so folgt daraus noch nicht eine bestimmte Einheit für die elektrische Feldstärke E, sondern nur für den Ausdruck $E\sqrt{\Delta} = \sqrt{\frac{2K}{f}}$, dessen Dimension $\mathbf{M^{\frac{1}{2}} L^{-\frac{1}{2}} T^{-1}}$ ist. Machen wir die Einheit der Dielektrizitätskonstante **D** mal so groß, den Zahlenwert Δ_0 also **D**mal so klein, so wird die

Einheit der Feldstärke $\mathbf{M}^{\frac{1}{2}}\mathbf{L}^{-\frac{1}{2}}\mathbf{T}^{-1}\mathbf{D}^{-\frac{1}{2}}$ mal so groß. Dies ist daher die Dimension von E. Ebenso müssen die Einheiten für die übrigen elektrischen Größen im allgemeinen aus vier Grundeinheiten abgeleitet werden.

Die Größe $\pm Q = \pm \Delta E f$ wird als die auf einer Platte angesammelte Elektrizitätsmenge bezeichnet, weil Q sich nicht ändert, solange die beiden Platten gegeneinander und gegen ihre Umgebung isoliert bleiben. Von der positiven zur negativen Platte verläuft ein „Verschiebungsfluß" Ψ. Verbinden wir je eine positive und eine negative Elektrizitätsmenge Eins durch ν „Verschiebungslinien", so wird $\Psi = \nu Q$. Die Dichte des Verschiebungsflusses, die sogenannte dielektrische Verschiebung ist $\Psi/f = D = \nu \Delta E$. Macht man ν **n**-mal so groß, so werden die Einheiten für Ψ und D **n**-mal so klein.

Wenn die beiden Platten beweglich angeordnet werden, so werden sie sich wegen der Anziehung nähern. Sind die Platten isoliert, so bleiben bei der Bewegung Q und E konstant. War der ursprüngliche Abstand der Platten s, so leistet die Kraft K die Arbeit $A = Ks = \frac{1}{2}\frac{\Delta f}{s}(Es)^2$. Man nennt $\Delta f/s = C$ die Kapazität des Kondensators und $Es = S$ die elektrische Spannung zwischen den Platten. Hiermit $Q = CS$ und $A = \frac{1}{2}CS^2 = \frac{1}{2}QS$.

Hieraus ergeben sich leicht für die elektrischen Größen folgende Dimensionen:

Elektrizitätsmenge Q	$\mathbf{M}^{\frac{1}{2}}\mathbf{L}^{\frac{3}{2}}\mathbf{T}^{-1}\mathbf{D}^{\frac{1}{2}}$
Verschiebungsfluß Ψ	$\mathbf{M}^{\frac{1}{2}}\mathbf{L}^{\frac{3}{2}}\mathbf{T}^{-1}\mathbf{D}^{\frac{1}{2}}\mathbf{n}^{-1}$
Strom J	$\mathbf{M}^{\frac{1}{2}}\mathbf{L}^{\frac{3}{2}}\mathbf{T}^{-2}\mathbf{D}^{\frac{1}{2}}$
Spannung S	$\mathbf{M}^{\frac{1}{2}}\mathbf{L}^{\frac{1}{2}}\mathbf{T}^{-1}\mathbf{D}^{-\frac{1}{2}}$
Kapazität C	$\mathbf{L}\mathbf{D}$
Widerstand R	$\mathbf{L}^{-1}\mathbf{T}\,\mathbf{D}^{-1}$
Induktivität L	$\mathbf{L}^{-1}\mathbf{T}^{2}\mathbf{D}^{-1}$

3b) Beziehungen zwischen magnetischen und mechanischen Größen. Ganz ähnliche Beziehungen lassen sich für das magnetische Feld aufstellen. Denken wir uns zwei Hufeisenmagnete, die sich mit entgegengesetzten Polen nahe gegenüberstehen. Mit einer Probenadel werde im Luftraum zwischen den ebenen Stirnflächen der sich gegenüberstehenden Pole in willkürlichem Maß die Feldstärke H gefunden. Die Anziehungskraft 2K der beiden Magnete wächst mit H^2 und mit der Polfläche f. Bezeichnen wir mit $\Pi/2$ einen Proportionalitätsfaktor, so können wir schreiben $K = \frac{\Pi}{2}H^2 f$. Die Größe Π ist für die meisten Stoffe nicht sehr verschieden von dem Wert Π_0 für Luft, dafür aber für die sogenannten ferromagnetischen um so mehr. Man nennt $\mu = \Pi/\Pi_0$ die Permeabilität des Stoffes. Wir wollen μ als relative, Π als absolute Permeabilität bezeichnen.

Als eine Einheit der Permeabilität werden wir das Henry/cm kennen lernen. Es ist $0{,}796 . 10^6$ mal so groß, wie die Permeabilität der Luft. Diese beträgt also

$$\Pi_0 = 1{,}257 . 10^{-8} \text{ Henry/cm.}$$

$H\sqrt{\Pi}$ hat dieselbe Dimension, wie $E\sqrt{\Delta}$. Macht man die Einheit der Permeabilität **P** mal so groß, Π_0 demnach **P** mal so klein, so wird die Einheit der magnetischen Feldstärke H $\mathbf{M}^{\frac{1}{2}}\mathbf{L}^{-\frac{1}{2}}\mathbf{T}^{-1}\mathbf{P}^{-\frac{1}{2}}$ mal so groß.

Wir wollen $\pm \mathfrak{Q} = \pm \Pi H f$ die magnetische Menge auf einem Pol nennen. Von Pol zu Pol geht ein magnetischer Kraftfluß (Induktionsfluß) Φ. Ziehen wir von jeder magnetischen Menge Eins aus $\varkappa$ Kraftlinien, so wird $\Phi = \varkappa \mathfrak{Q}$ und die Kraftliniendichte (Induktion) $\frac{\Phi}{f} = B = \varkappa \Pi H$.

Macht man $\varkappa$ **k**-mal so groß, so werden die Einheiten für Φ und B **k**-mal so klein.

Für die magnetischen Größen gelten hiernach folgende Dimensionen:

Induktionsfluß Φ	$\mathbf{M}^{\frac{1}{2}}\mathbf{L}^{\frac{3}{2}}\mathbf{T}^{-1}\mathbf{P}^{\frac{1}{2}}\mathbf{k}^{-1}$
Induktion B	$\mathbf{M}^{\frac{1}{2}}\mathbf{L}^{-\frac{1}{2}}\mathbf{T}^{-1}\mathbf{P}^{\frac{1}{2}}\mathbf{k}^{-1}$
Magn. Feldstärke H	$\mathbf{M}^{\frac{1}{2}}\mathbf{L}^{-\frac{1}{2}}\mathbf{T}^{-1}\mathbf{P}^{-\frac{1}{2}}$

3c) Beziehungen zwischen elektrischen und magnetischen Größen. Wenn durch einen langen Draht ein Strom geschickt wird, so entsteht in seiner Umgebung ein magnetisches Feld. Die Kraftlinien bilden Kreise um die Drahtachse (vgl. den Artikel „Magnetfeld" 5f 1). Es zeigt sich, daß die Arbeit, die nötig ist, um einen Magnetpol einmal um den Draht herum bis zum Ausgangspunkt zurückzuführen, für die verschiednen Umlaufswege stets gleich ausfällt. Führen wir den Pol etwa auf einem Kreis mit dem Radius x herum und bezeichnen die magnetische Feldstärke im Abstand x vom Draht mit H, so ist der Quotient aus der Arbeit A und der magnetischen Menge $\mathfrak{Q}$ des Poles $A/\mathfrak{Q} = 2\pi x H$. Dieser Quotient ist dem umschlungenen Strom (der sogenannten elektrischen Durchflutung des Weges) proportional, in diesem Fall also dem Strom J, der in dem Draht fließt. Auch in andern, weniger einfachen Fällen ist die Umführungsarbeit immer dem umschlungenen Strom proportional und wird durch keine andern physikalischen Größen beeinflußt. Der für unsern einfachen Fall geltende Ausdruck $\frac{J}{2\pi x H}$ ist also eine Konstante, die auch in andern Fällen angibt, wieviel mal so groß

die Durchflutung ist als die Umlaufsarbeit des Einheitspoles. Als Dimension dieser Konstante finden wir

$$\left[\frac{J}{2\pi x H}\right] = \frac{\mathbf{M}^{\frac{1}{2}}\mathbf{L}^{\frac{3}{2}}\mathbf{T}^{-2}\mathbf{D}^{\frac{1}{2}}}{\mathbf{M}^{\frac{1}{2}}\mathbf{L}^{\frac{1}{2}}\mathbf{T}^{-1}\mathbf{P}^{-\frac{1}{2}}} = \mathbf{L}\mathbf{T}^{-1}\mathbf{D}^{\frac{1}{2}}\mathbf{P}^{\frac{1}{2}}.$$

Nun ist $\mathbf{L}\mathbf{T}^{-1}$ die Dimension einer Geschwindigkeit. Das veranlaßt uns, indem wir mit c eine Geschwindigkeit bezeichnen, für die Konstante den Ausdruck $c\sqrt{\varDelta\Pi}$ einzuführen. Bei einer Veränderung von $\varDelta$ und Π muß sich also c^2 umgekehrt proportional zu dem Produkt $\varDelta\Pi$ ändern. Wir gelangen so zu der Gleichung

$$c \, . \, 2\pi x H\sqrt{\Pi} = \frac{J}{\sqrt{\varDelta}}$$

und speziell für Luft $c_0 . 2\pi x H\sqrt{\Pi_0} = J/\sqrt{\varDelta_0}$. Nun sind die Ausdrücke $H\sqrt{\Pi_0}$ und $J/\sqrt{\varDelta_0}$ durch die Wahl des mechanischen Maßsystems völlig bestimmt. Wir erhalten daher für c_0 immer dieselbe Geschwindigkeit, wie wir auch $\varDelta_0$ und Π_0 wählen mögen. Und zwar ergibt die Beobachtung zusammengehöriger Werte von H und J $c_0 = 300\,000$ km/sek. Das ist aber die Geschwindigkeit des Lichtes im leeren Raum. Der Zahlenwert von c_0 hängt davon ab, mit welcher Längeneinheit und Zeiteinheit die Geschwindigkeit c_0 gemessen wird, folglich der Zahlenwert der Konstante

$$\frac{J}{2\pi x H} = c_0\sqrt{\varDelta_0 \Pi_0}$$

von der Wahl der Längeneinheit, der Zeiteinheit und der Zahlenwerte $\varDelta_0$ und Π_0.

Wenn sich der magnetische Fluß, der durch einen Drahtring hindurchgeht, ändert, so entsteht in dem Drahtring ein Strom J, der um so größer ist, je größer der Zuwachs $d\Phi$ des Flusses Φ in einer bestimmten kurzen Zeit dt ist und je kleiner der Widerstand R des Drahtringes ist. Es ist also RJ proportional zu $d\Phi/dt$ (vgl. den Artikel „Magnetfeldwirkungen" 2a). Für den Proportionalitätsfaktor erhalten wir folgende Dimension

$$\left[\frac{d\Phi}{RJdt}\right] = \frac{\mathbf{M}^{\frac{1}{2}}\mathbf{L}^{\frac{3}{2}}\mathbf{T}^{-1}\mathbf{P}^{\frac{1}{2}}\mathbf{k}^{-1}}{\mathbf{M}^{\frac{1}{2}}\mathbf{L}^{\frac{1}{2}}\mathbf{D}^{-\frac{1}{2}}} = \mathbf{L}\mathbf{T}^{-1}\mathbf{D}^{\frac{1}{2}}\mathbf{P}^{\frac{1}{2}}\mathbf{k}^{-1}$$

und setzen daher für ihn den Ausdruck $\varkappa c'\sqrt{\varDelta\Pi}$ an, wo c' wiederum eine Geschwindigkeit ist. Verfolgt man die Energieumsetzungen, so zeigt sich, daß $c' = c$ sein muß. Da ferner ein Strom im positiven Sinn entsteht, wenn Φ abnimmt, so führen wir noch ein negatives Vorzeichen ein und erhalten

$$c_0 . RJ\sqrt{\varDelta_0} = -\frac{1}{\varkappa\sqrt{\Pi_0}} \cdot \frac{d\Phi}{dt}.$$

4. Die gebräuchlichen Maßsysteme. Wir wollen jetzt angeben, welche Werte für $\varDelta_0$, Π_0, ν, $\varkappa$ man in den gebräuchlichen Maßsystemen gewählt hat, und zeigen, wie man zu dieser Wahl geführt worden ist.

4a) Absolute elektrostatische Einheiten für die elektrischen Größen (Gauß). Befindet sich eine mit der Elektrizitätsmenge Q geladene, isolierte kleine Kugel im freien Raum, so gehen von ihr gleichmäßig nach allen Seiten hin elektrische Verschiebungslinien aus, ähnlich wie die Lichtstrahlen von einem leuchtenden Punkt. Der Verschiebungsfluß $\Psi = \nu Q$ verteilt sich im Abstand r auf eine Kugelfläche vom Inhalt $4\pi r^2$. Daher ist die dielektrische Verschiebung im Abstand r $D = \frac{\nu Q}{4\pi r^2}$ und die elektrische Feldstärke

$$E = \frac{D}{\nu\varDelta_0} = \frac{Q}{4\pi r^2 \varDelta_0}.$$

Bringt man dorthin eine zweite kleine Kugel mit der Ladung Q', so wirkt auf sie eine mechanische Kraft

$$K = EQ' = \frac{1}{4\pi\varDelta_0} \cdot \frac{QQ'}{r^2}.$$

(Coulombsches Gesetz). Um diese Beziehung möglichst zu vereinfachen, hat man $4\pi\varDelta_0 = 1$ gesetzt, also

$$\varDelta_0 = \frac{1}{4\pi} = 0{,}0796 \quad \text{und} \quad \varDelta = \frac{\varepsilon}{4\pi},$$

und zwar unabhängig davon, welches mechanische Maßsystem zugrunde gelegt wird. Demnach ist $\varDelta_0$ eine reine (unbenannte) Zahl. Es entsteht so das „absolute elektrostatische" Maßsystem. Um die für dieses gültigen Dimensionsformeln zu erhalten, braucht man nur in den früher angegebenen überall **D** zu streichen.

Etwas schwankend ist der Brauch hinsichtlich des Wertes von ν. Maxwell setzt $\nu = 1$, Hertz dagegen $\nu = 4\pi$ (neuerdings auch M. Abraham).

4b) Absolute magnetostatische Einheiten für die magnetischen Größen (Gauß). In ganz ähnlicher Weise läßt sich das Coulombsche Gesetz für zwei Magnetpole mit den Mengen $\mathfrak{Q}$ und $\mathfrak{Q}'$ aufstellen:

$$K = \frac{1}{4\pi\Pi_0} \cdot \frac{\mathfrak{Q}\mathfrak{Q}'}{r^2}.$$

Deshalb hat man $\Pi_0 = \frac{1}{4\pi} = 0{,}0796$ und $\Pi = \frac{\mu}{4\pi}$ gesetzt. Um die für dieses Maßsystem passenden Dimensionen zu erhalten, braucht man nur in den angegebenen Dimensionsformeln überall das **P** zu streichen.

Auf magnetischem Gebiet hat man wohl hierbei immer angenommen, daß von der Menge Eins 4π Kraftlinien ausgehen, also

Digitized by Google

$\varkappa = 4\pi$ gesetzt, so daß $\varkappa \Pi_0 = 1$ und in Luft $B = H$ wird.

4c) Absolute elektromagnetische Einheiten für die elektrischen Grössen (Weber). Wie F. Neumann gezeigt hat, läßt sich die Gegeninduktivität L_{12} zweier Stromkreise s_1, s_2 darstellen durch

$$L_{12} = \frac{1}{c_0^2 \Delta_0} \int_{(s_1)} \int_{(s_2)} \frac{\cos(ds_1 ds_2)}{4\pi r} \, ds_1 ds_2,$$

worin r den Abstand der beiden Leiterstücke ds_1 und ds_2 bedeutet. Diesem und ähnlichen Ausdrücken zuliebe hat man ein Maßsystem aufgestellt, für das $4\pi c_0^2 \Delta_0 = 1$, folglich $\Delta_0 = \frac{1}{4\pi c_0^2}$ und $\Delta = \frac{\varepsilon}{4\pi c_0^2}$ wird. Da hierin c_0 eine ganz bestimmte Geschwindigkeit bedeutet und sich also der Zahlenwert von c_0 bei einem Wechsel der Längeneinheit und der Zeiteinheit ändert, so hängt auch der Zahlenwert von Δ_0 von der Wahl der Längeneinheit und Zeiteinheit ab. Δ_0 ist jetzt also eine benannte Zahl und zwar von der Dimension $L^{-2}T^2$. Daher erhält man die Dimensionen der elektrischen Größen in dem hierdurch entstehenden „elektromagnetischen" Maßsystem, indem man in den früher angegebenen Dimensionen D durch $L^{-2}T^2$ ersetzt. Das ergibt

Elektrizitätsmenge Q	$M^{\frac{1}{2}}L^{\frac{1}{2}}$
Verschiebungsfluß Ψ	$M^{\frac{1}{2}}L^{\frac{1}{2}}n^{-1}$
Strom J	$M^{\frac{1}{2}}L^{\frac{1}{2}}T^{-1}$
Spannung S	$M^{\frac{1}{2}}L^{\frac{3}{2}}T^{-2}$
Kapazität C	$L^{-1}T^2$
Widerstand R	LT^{-1}
Induktivität L	L

Mißt man die Geschwindigkeit z. B. nach cm/sek, so wird der Zahlenwert von Δ_0

$$\Delta_0 = \frac{1}{4\pi . 9 . 10^{20}} = 0{,}884 . 10^{-22} \frac{\text{sek}^2}{\text{cm}^2}$$

4d) Kombinationen. Mißt man die elektrischen Größen elektrostatisch und die magnetischen magnetostatisch, so spricht man nach Helmholtz von einem Gaußschen Maßsystem. Für dieses ist

$$c_0 \sqrt{\Delta_0 \Pi_0} = \frac{c_0}{4\pi} = 2{,}388 . 10^9 \frac{\text{cm}}{\text{sek}} = 23880 \frac{\text{km}}{\text{sek}}.$$

Mißt man dagegen die elektrischen Größen elektromagnetisch und die magnetischen magnetostatisch, so erhält man das elektromagnetische Maßsystem. Für dieses ist

$$c_0 \sqrt{\Delta_0 \Pi_0} = \frac{1}{4\pi} = 0{,}0796.$$

Als mechanisches Maßsystem legt man in beiden Fällen gewöhnlich das cgs-System zugrunde. Die hierdurch entstehenden Einheiten sind aber gegenüber den praktisch vorkommenden Werten meist entweder ungeheuer groß oder ungeheuer klein. Das elektrostatische cgs-System hat eine brauchbare Spannungseinheit, das elektromagnetische eine brauchbare Stromeinheit.

4e) „Praktisches" Maßsystem. Vorgeschlagen 1869 von der British Association for the advancement of science, angenommen 1881 vom Elektrikerkongreß in Paris. — Wegen der unbequemen Größe oder Kleinheit der Einheiten in den oben besprochenen Systemen hat man für die Elektrotechnik ein anderes elektromagnetisches Maßsystem aufgestellt, richtiger: einen Torso eines solchen. Es entsteht auf folgende Weise: Es sei n ein willkürlicher Exponent, und die Grundeinheiten seien 10^{7-n} Meter, 10^{2n-11} Gramm, 1 Sekunde; endlich sei $\Delta_0 = \frac{10^n}{4\pi c_0^2}$, oder da c_0 hier den Zahlenwert 30.10^n hat, $\Delta_0 = 0{,}884 . 10^{-(n+4)}$. Für n, Π_0, $\varkappa$, ν sind keine Werte festgesetzt worden. Die hierdurch bestimmten Einheiten führen folgende Namen

Trägheitsmoment	m^2kg
Drehimpuls	Joulesekunde
Arbeit	Joule
Leistung	Watt
Elektrizitätsmenge	Coulomb
Strom	Ampere
Spannung	Volt
Widerstand	Ohm
Induktivität	Henry
Kapazität	Farad

Das Millionfache wird durch das Präfix „Mega" angedeutet und der millionste Teil durch das Präfix „Mikro". Da das Farad gegen die praktisch vorkommenden Kapazitäten viel zu groß ist, wird gewöhnlich das Mikrofarad benutzt. Auch das Coulomb ist eine außerordentlich große Elektrizitätsmenge. Zwei punktförmige Elektrizitätsmengen von je 1 Coulomb würden nämlich noch in 1 km Abstand aufeinander mit einer Kraft von rund 1 Tonne wirken.

Die mechanischen Maßsysteme, die mit diesem „praktischen" elektrischen Maßsystem vereinbar sind, werden im Diagramm der mechanischen Einheiten durch die Punkte dargestellt, die auf der Watt-Linie liegen. Hierzu gehört nicht das cgs-System. Jedem solchen Punkt entspricht ein bestimmter Wert von n. Z. B. gibt n = 7 als Längeneinheit das Meter und als Masseneinheit das Kilogramm, oder n = 9 als Längeneinheit das Zentimeter und als Masseneinheit 10 Tonnen. Aus dem Diagramm ist ersichtlich daß 9,81 Joule = 1 kg*m oder 1 Joule = 0,102 kg*m = 0,23865 (15°-)Gramm-Kalorien oder 1 (15°-)Gramm-Kalorie = 4,189 Joule.

Genau sind die Zahlenwerte in dem Diagramm natürlich nicht erkennbar.

Tatsächlich wird das „praktische“ Maßsystem nicht mehr mechanisch (durch Δ_0) definiert, sondern als Grundeinheiten gelten das durch ein Quecksilbernormal definierte Ohm und das durch das Silbervoltameter definierte Ampere (vgl. den Artikel „Elektrische Maßnormale“). Hiermit ergeben sich folgende Dimensionen:

Elektrizitätsmenge Q	**JT**
Verschiebungsfluß Ψ	$\mathbf{JTn^{-1}}$
Spannung S	**RJ**
Kapazität C	$\mathbf{R^{-1}T}$
Induktivität L	**RT**

Das mechanische Aequivalent des elektrisch definierten Joules ist sehr nahe 10^7 Erg. Die Abweichung läßt sich wohl heute noch nicht angeben. Δ_0 und Π_0 sind jetzt nicht mehr willkürlich wählbare Zahlen, sondern Messungsobjekte. Man setze $c_0^2\Delta_0\Pi_0 = 1$. Dann findet man $H = \frac{J}{2\pi x}$ und weiter Δ_0 aus $K = \frac{1}{2}\Delta_0 E^2 f$ und Π_0 aus $K = \frac{1}{2}\Pi_0 H^2 f$ und endlich $c_0 = 1/\sqrt{\Delta_0\Pi_0}$.

G. Giorgi und G. Mie schlagen vor, zur Vervollständigung des „praktischen“ Maßsystems $\Pi_0 = 4\pi.10^{-n}$ und $\varkappa = 1$ zu setzen, so daß $c_0\sqrt{\Delta_0\Pi_0} = 1$ wird. Giorgi wählt n = 7, während Mie in seinem Lehrbuch n = 9 benutzt.

Im „praktischen“ Maß ist

$$\Delta_0 = \frac{10^{-11}}{36\pi}\,\frac{\text{Farad}}{\text{cm}} = 0{,}884.10^{-13}\,\frac{\text{Farad}}{\text{cm}}.$$

Um auch Π_0 in „praktischem“ Maß anzugeben, nehmen wir $c_0^2\Delta_0\Pi_0 = 1$ an und finden

$$\Pi_0 = \frac{1}{c_0^2\Delta_0} = \frac{4\pi}{10^9}\,\frac{\text{Henry}}{\text{cm}} = 1{,}257.10^{-8}\,\frac{\text{Henry}}{\text{cm}}.$$

4f) „Absolute“ cgs-Einheiten in „praktischem“ Maß. Man bekommt von der Größe der elektrischen cgs-Einheiten am besten eine Vorstellung, wenn man sie durch die heute schon allgemein geläufigen „praktischen“ Einheiten ausdrückt. Die Werte sind in der folgenden Tabelle zusammengestellt.

cgs-Einheit für	elektrostatisch	elektromagnetisch
Ladung Q	$0{,}333.10^{-9}$ Coulomb	10 Coulomb
Strom J	$0{,}333.10^{-9}$ Ampere	10 Ampere
Spannung S	300 Volt	10^{-8} Volt
Widerstand R	$0{,}9.10^{12}$ Ohm	10^{-9} Ohm
Induktivität L	$0{,}9.10^{12}$ Henry	10^{-9} Henry
Kapazität C	$1{,}111.10^{-12}$ Farad oder	10^{9} Farad oder
	$1{,}111.10^{-6}$ Mikrofarad	10^{15} Mikrofarad

1 Erg $= 10^{-7}$ Joule $= 1{,}02.10^{-8}$ kg*m
$= 2{,}3865.10^{-11}(15^0\text{-})$Kilogrammkalorie.

Die absolute magnetostatische cgs-Einheit der magnetischen Feldstärke ist = 0,796 Amp/cm.

5. Mängel der gebräuchlichen Maßsysteme. 5a) Stellung des Faktors 4π (Heaviside). Wie aus dem Vorhergehenden ersichtlich ist, sind die Werte von Δ_0 und Π_0 in den absoluten Maßsystemen so gewählt worden, daß der Faktor 4π in den Formeln nicht den ihm logisch zukommenden Platz erhält. Er sollte überall da auftreten, wo es sich um die Verteilung eines Flusses über eine Kugelfläche handelt. Bei Rechnungen nach „absolutem“ Maß fehlt er gerade in diesen Fällen, erscheint aber dafür in andern ganz unerwartet, z. B. in Formeln, die sich auf einen Plattenkondensator oder auf den Luftspalt in einem magnetischen Kreis beziehen. Oliver Heaviside, der zuerst auf die unlogische Stellung des Faktors 4π in den „absoluten“ Maßsystemen hingewiesen hat, vergleicht die absoluten Maßsysteme mit einem geometrischen, in dem als Flächeneinheit nicht das Quadrat mit der Seite Eins gilt, sondern der Kreis mit dem Radius Eins. In einem solchen geometrischen Maßsystem würde die Zahl π in dem Ausdruck für den Flächeninhalt eines Kreises nicht vorkommen, dagegen in den Ausdrücken für die Flächeninhalte der Polygone.

Heaviside nennt Maßsysteme, bei denen in den Werten für $\Delta_0, \Pi_0, \nu, \varkappa$ der Faktor 4π nicht vorkommt, rationale. Er hat auch in seinen Abhandlungen als erster rationales Maß benutzt. Seitdem findet es sich oft in theoretischen Abhandlungen, besonders in neuerer Zeit durch den Einfluß der „Enzyklopädie der mathematischen Wissenschaften“.

5b) Stellung des Faktors c_0 (Helmholtz). Im elektromagnetischen Maßsystem — auch das „praktische“ ist ein solches — hat auch die Lichtgeschwindigkeit c_0 nicht den ihr logisch zukommenden Platz. Ihr rechtmäßiger Platz ist dort, wo es sich um Beziehungen zwischen elektrischen und magnetischen Größen handelt. Sie sollte daher

Digitized by Google

weder in der Elektrostatik, noch in der Magnetostatik auftreten. Dieser Forderung genügt das von Helmholtz eingeführte und auch von Hertz benutzte Gaußsche Maßsystem.

H. A. Lorentz hat in der „Enzyklopädie der mathematischen Wissenschaften" ein Heaviside-Gaußsches oder rationales Gaußsches Maßsystem eingeführt, das sowohl dem 4π, wie dem c_0 seinen rechtmäßigen Platz anweist, indem er setzt

$$\Delta_0 = \Pi_0 = \nu = \varkappa = 1.$$

Behält man für die mechanischen Größen das cgs-System bei, so hat man, um die neuen Einheiten durch die alten auszudrücken, in den Dimensionen

$$\mathbf{M} = \mathbf{L} = \mathbf{T} = 1, \quad \mathbf{D} = \mathbf{P} = \mathbf{k} = \frac{1}{4\pi}$$

und $\mathbf{n} = 1$ (Maxwell) oder $= \frac{1}{4\pi}$ (Hertz) zu setzen.

5c) Größenordnung der Einheiten. In der Physik wird als mechanisches Maßsystem seit 1881 allgemein das cgs-System benutzt und auch den elektrischen und magnetischen Einheiten zugrunde gelegt. Aber seine Einheiten sind zweifellos nicht nur für die Technik, sondern auch für die Physik zu winzig. Ein Blick auf das Diagramm der mechanischen Einheiten zeigt, daß der cgs-Punkt weit entfernt von dem Gebiet der praktisch gebräuchlichen Einheiten liegt. Das Dyn ist ungefähr so groß, wie die Milligrammkraft, und das Erg ist ungefähr die Arbeit, die beim Heben eines Milligrammgewichts um 1 cm geleistet wird. Es sind also außerordentlich kleine Einheiten. Für die Technik ist dieses Maßsystem daher gar nicht diskutabel. Sie braucht ein Maßsystem, in dem die Leistungseinheit ungefähr so groß ist, wie das Kilowatt oder die Pferdestärke. Wie aus dem Diagramm der mechanischen Einheiten sofort zu erkennen ist, sind hierzu vor allem als Grundeinheiten das Meter und die Tonnenmasse geeignet. Die Leistungseinheit ist dann gerade 1 Kilowatt und die Krafteinheit 102 kg*.

Eine solche Festsetzung hat nicht den Sinn, daß alle Längen in Metern und alle Massen in Tonnen angegeben werden sollen, sondern es handelt sich hier lediglich um eine bequeme Vorschrift für Rechnungen nach den Lehren der Mechanik. Nur bei der Rechnung sollen alle Längen in Metern, alle Massen in Tonnen usw. eingesetzt werden. Das Resultat kann man dann wieder nach Belieben in andern Einheiten angeben.

Damit ist aber noch nicht gewährleistet, daß auch die elektrischen und die magnetischen Einheiten die wünschenswerte Grössenordnung annehmen. Dies läßt sich wenigstens für die wichtigsten Einheiten dadurch erreichen, daß man die Einheiten für die Dielektrizitätskonstante und Permeabilität groß gegen die Dielektrizitätskonstante und die Permeabilität der Luft wählt, also für diese selbst kleine Zahlenwerte Δ_0 und Π_0. Um das Heavisidesche und das Helmholtzsche Prinzip zu wahren, wird man für $\varepsilon_I = 1/\Delta_0$ und $\mu_I = 1/\Pi_0$ ganze Potenzen von 10 wählen. Wie bei den mechanischen Einheiten, so kann man sich auch hier durch ein Diagramm eine Uebersicht verschaffen. In Figur 2 ist $\log \varepsilon_I$ als Abszisse und $\log \mu_I$ als Ordinate aufgetragen, und unter Zugrundelegung des Meter-Tonnen-Sekunden-Systems sind die entsprechenden Einheiten für Strom, Spannung, magnetische Induktion und magnetische Feldstärke angeschrieben. Aus dem Diagramm ersieht man, daß etwa die folgenden Festsetzungen geeignet sind:

$$\Delta_0 = 10^{-10}, \ \Pi_0 = 10^{-2}, \ \nu = \varkappa = 1,$$

also
$$\Delta = \frac{\varepsilon}{10^{10}}, \quad \Pi = \frac{\mu}{100}.$$

Um die elektrischen Einheiten dieses Maßsystems durch die „praktischen" auszudrücken, braucht man nur

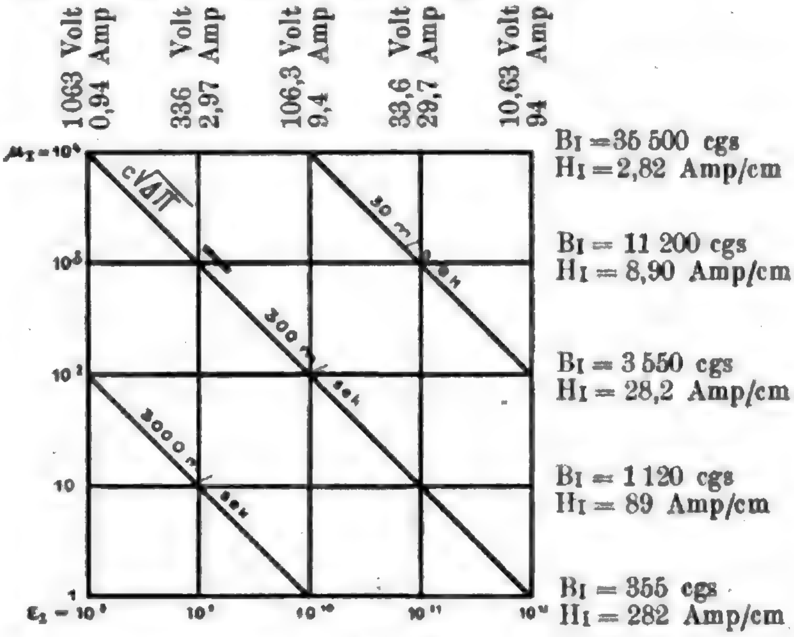


Fig. 2.

$$\mathbf{M} = 10^{17-2n}, \ \mathbf{L} = 10^{n-7}, \ \mathbf{T} = 1, \ \mathbf{D} = \frac{10^{8-n}}{36\pi}$$

in die früher angegebenen Dimensionen einzusetzen und findet dann als Einheiten

Digitized by Google

9,40 Coulomb; 9,40 Ampere; 106,3 Volt; 11,31 Ohm; 11,31 Henry; 0,0884 Farad.

Um ferner die magnetischen Einheiten dieses Maßsystems durch die cgs-Einheiten auszudrücken, hat man

$$\mathbf{M} = 10^6,\ \mathbf{L} = 10^2,\ \mathbf{T} = 1,\ \mathbf{P} = \frac{100}{4\pi},\ \mathbf{k} = \frac{1}{4\pi}$$

in die Dimensionen einzusetzen. Man erhält als Einheit für die Feldstärke 35,45 (cgs) = 28,2 Amp/cm; für die Induktion 3 545 (cgs), für den Induktionsfluß $35{,}45 . 10^6$ (cgs); für die magnetische Spannung (= Feldstärke × Weg) 3 545 (cgs) = 2 820 Amp. Für den magnetischen „Widerstand" (= Spannung: Fluß) 10^{-4} (cgs).

Für die Präzisionsmessung wäre dieses Maßsystem so zu definieren: Längeneinheit: 1 Meter; Zeiteinheit: 1 Sekunde; dem Ohm-Normal wird der Zahlenwert 0,0884 zugeschrieben; als Einheit gilt der Strom, der in der Sekunde 10,51 Milligramm Silber niederschlägt; es ist $c\sqrt{\Delta\Pi} = 300$ m/sek zu setzen.

$$\mathbf{R} = 11{,}31,\ \mathbf{J} = 9{,}40,\ \mathbf{T} = 1,\ \mathbf{L} = 10^{n-7}.$$

Literatur. ***L. Grunmach***, *Magnetische und elektrische Maßeinheiten. Stuttgart 1895.* — ***G. Mie***, *Elektrizität und Magnetismus. Stuttgart 1910.* — ***J. B. J. Fourier***, *Analytische Theorie der Wärmeleitung, Art. 157 bis 162.* — ***E. Cohn***, *Das elektromagnetische Feld. Leipzig 1900.* — ***H. Helmholtz***, *Wied. Ann. 17, S. 42, 1882.* — ***G. Giorgi***, *L'Elettricista. 1902.* — ***O. Heaviside***, *The Electrician, 1882/83 und 27, 1891, S. 655 oder Electromagnetic Theory § 90.* — ***H. A. Lorentz***, *Enzykl. math. Wiss. V, 13, Nr. 7, S. 83, 1904.* — *Weitere Literaturangaben in der Elektrotechnischen Zeitschrift, S. 432 bis 440, 1904.*

F. Emde.

Elektrische Schwingungen

siehe den Artikel „Schwingungen, Elektrische Schwingungen".

Elektrische Spannung.

1. Definition des Begriffes Spannung. 2. Einteilung der Spannungen. 3. Einheiten der Spannung. 4. Messung der Spannung: a) Das Kompensationsverfahren. α) Kompensator nach Feußner. β) Kompensator nach Raps. γ) Kompensator nach Hausrath und Diesselhorst. δ) Meßbereiche der Kompensatoren und Messung höherer Spannungen mit ihrer Hilfe. b) Direkte Spannungsmessung nach dem Elektrometerprinzip. α) Elektrostatische Elektrometer. β) Das Kapillarelektrometer. c) Indirekte Messung von Spannungen aus Stromstärke und Widerstand.

1. Definition des Begriffes Spannung. Zu dem Begriff und der Definition der elektrischen Spannung gelangt man am besten, wenn man von der Grundlage aller elektrischen Erscheinungen, dem Elektron, ausgeht.

Zerlegt man ein chemisches Atom durch geeignete Kräfte in seine elektrischen Bestandteile, so erhält man im einfachsten Falle einerseits das negative Elektron oder Elektrizitätsatom, andererseits den positiven Atomrest, der aus dem besteht, was man Materie nennt. Die Eigenschaften des Elektrons sind in einem besonderen Artikel „Elektronen" ausführlich behandelt. Hier kommt nur die Erscheinung in Frage, daß sich Elektronen gegenseitig abstoßen, Elektronen und positive Atomreste gegenseitig anziehen.

Die dabei auftretenden Kräfte nehmen proportional dem Quadrate der Entfernung der aufeinander wirkenden Körper ab. Nur in unmittelbarer Nähe der Elektronen gilt ein anderes Gesetz. Man macht sich ein Bild von diesem Verhalten, indem man sagt, das Elektron sei von einem elektrischen Felde umgeben, dessen Intensität mit der Entfernung vom Elektron abnimmt und erst in unendlicher Entfernung Null wird. Die Stärke eines relativ zum Beobachter ruhenden elektrischen Feldes setzt man der Stärke der elektrischen Ladung proportional, die es erzeugt. Soviel man bis jetzt weiß, sind die Felder aller Elektronen gleich, und auch die Felder aller einwertigen positiven Atomreste haben dieselbe Feldintensität wie die der Elektronen. Nur schreibt man ihrem Felde die entgegengesetzte Richtung zu, um ihre entgegengesetzte Wirkung zu erklären.

Das elektrische Feld eines einzelnen Elektrons ist unmeßbar klein. Vereinigt man viele Elektronen auf einem kleinen Raume, so addieren sich ihre Felder und man erhält ein makroskopisches Feld, das in einem Abstande von dem Elektronenhaufen, der gegen dessen Abmessungen groß ist, ebenfalls proportional dem Quadrat der Entfernung vom Schwerpunkt des Haufens abnimmt. Man kann die Stärke dieses Feldes an einem gegebenen Punkte messen, indem man ein einzelnes Elektron an den Punkt bringt. Die Stärke des Feldes ist proportional der abstoßenden Kraft, die es auf das Elektron ausübt, wobei angenommen ist, daß das Feld so stark ist, daß es durch das Feld des einzelnen Elektrons nicht merklich geändert wird.

Bei der Ueberführung eines Elektrons von einem Punkte a eines elektrischen Feldes zu einem Punkte b, an dem das Feld stärker ist, muß Arbeit geleistet werden. Der Betrag dieser Arbeit ergibt sich, wenn man sich den

Weg a b in so viele Teile zerlegt denkt, daß sich die Feldstärke innerhalb eines Abschnittes nicht merklich ändert, für jeden Abschnitt das Produkt aus seiner Länge a und der Komponente der Feldstärke in der Richtung des Abschnittes bildet und alle Produkte addiert.

Solange sich das elektrische Feld zeitlich nicht ändert, ist die bei dem Uebergange von a nach b zu leistende Arbeit von dem Wege, auf dem der Uebergang von a nach b geschieht, unabhängig. Es ist also auch eine ganz bestimmte Arbeit nötig, um ein Elektron aus der Unendlichkeit, in der das elektrische Feld Null ist, bis zum Punkte a zu befördern. Umgekehrt kann das Elektron die gleiche Arbeit leisten, wenn es sich vom Punkte a bis in die Unendlichkeit bewegt. Um diese Arbeitsfähigkeit des elektrischen Feldes zu veranschaulichen, hat man eine neue Größe, das Potential des Feldes, eingeführt und so definiert: Das Potential eines Punktes in einem elektrischen Felde ist gleich derjenigen Arbeit, die geleistet werden muß, um ein Elektron aus der Unendlichkeit nach dem Punkte zu bringen. Ebenso ist die Potentialdifferenz zwischen zwei Punkten gleich der Arbeit, die aufgewandt werden muß, um ein Elektron von dem einen Punkte zum anderen zu bringen. Statt Potentialdifferenz ist nun das bequeme Wort Spannung eingeführt worden. Danach ist also die Spannung, ebenso wie das Potential, die eine von zwei Größen, deren Produkt eine Arbeit oder eine Energie ergibt (die andere Größe ist die Elektrizitätsmenge). Man kann also die Spannung als Energiefaktor bezeichnen. Ihr Gebiet ist der freie Raum in der Umgebung der Elektronen oder der positiven Atomreste. Um diese Fähigkeit des Raumes, die elektrische Spannung aufzunehmen, zu kennzeichnen, nennt man ihn Dielektrikum und dehnt die Bezeichnung auch auf diejenigen Körper im Raume aus, in denen freibewegliche elektrische Ladungen nicht vorhanden sind und in denen sich infolgedessen einmal vorhandene Spannungen nicht ausgleichen können.

Die bisher beschriebenen Kraftwirkungen zwischen elektrischen Ladungen ergeben sich jedoch unverändert nur solange, als die Ladungen relativ zum Beobachter ruhen. Sobald sie relativ zu ihm in Bewegung sind, treten neue Erscheinungen auf, die den Betrag der Kräfte ändern. Bewegen sich zum Beispiel zwei Ladungen gleichen Vorzeichens mit gleicher Geschwindigkeit und einander parallel, so daß ihr Abstand voneinander konstant bleibt, so mißt der ruhende Beobachter eine geringere Abstoßungskraft zwischen ihnen, als wenn sie bei gleichem Abstande auch ruhten. Das kann bei der Spannungsmessung in Frage kommen. Man denke sich zwei Leiter, die beide auf die gleiche Spannung geladen sind und sich in einem bestimmten Abstande voneinander befinden. Die Ladungen auf ihm sollen zunächst ruhen. Dann besteht zwischen den beiden Leitern eine bestimmte Abstoßungskraft, die sich aus ihren Dimensionen und der Größe der Ladungen ergibt. Jetzt mögen an die Stelle der ruhenden bewegte Ladungen treten, wie man sie erhält, wenn man durch beide Leiter zwei Ströme gleicher Richtung fließen läßt, die so beschaffen sind, daß die Leiter stets dieselbe Ladung besitzen wie im Zustande der Ruhe. Dann ist die Abstoßungskraft zwischen den beiden Leitern geringer als vorher. Es ist als ob sich eine mit der Stärke der beiden Ströme, also der Geschwindigkeit der Ladungen zunehmende Anziehungskraft über die ursprüngliche Abstoßungskraft gelagert hätte.

Man macht sich von der Erscheinung ein Bild, indem man sagt: Gleichgerichtete elektrische Ströme ziehen einander mit einer Kraft an, die u. a. dem Produkt aus den beiden Stromstärken proportional ist. Auch die Umkehrung gilt: Entgegengesetzte Ströme stoßen einander mit der gleichen Kraft ab.

An diesen Erscheinungen folgt, daß man nur mit ruhenden Ladungen arbeiten darf, wenn man Spannungen mit Hilfe ihrer Anziehungs- oder Abstoßungskräfte messen will.

Ferner darf man von Potential und Spannung eines elektrischen Feldes nur solange reden, als das Feld zeitlich konstant ist. Aendert sich das Feld während der Ueberführung des Elektrons vom einen Punkt zum anderen, so ist die aufzuwendende Arbeit nicht mehr vom Wege unabhängig und die Begriffe Potential und Spannung verlieren ihren Sinn.

Mit wechselnden elektrischen Feldern wird in der Technik sehr viel gearbeitet und dabei doch von elektrischer Spannung gesprochen. Das ist zulässig, da es sich in der Technik stets um die Spannung zwischen zwei Punkten eines linearen Leiters (Drahtes, Kabels usw.) handelt. Durch diesen Leiter ist aber den Elektronen ein ganz bestimmter Weg von dem einen Punkte zum anderen vorgeschrieben und damit die für die Ueberführung aufzuwendende Arbeit, also auch die Spannung, eindeutig definiert. Es darf aber nie vergessen werden, daß diese Spannung nur für eine ganz bestimmte Lage des die beiden Punkte verbindenden Leiters gilt und sich ändert, sobald die Lage des Leiters geändert wird.

Mit dieser Einschränkung kann man auch von Spannungen, die durch wechselnde Felder erzeugt werden, von den sogenannten Wechselspannungen reden.

2. Einteilung der Spannungen. Es ergibt sich dann folgende Einteilung der in der Technik gebräuchlichen Spannungen nach ihrer Intensität und Richtung:

1. Gleichspannung von konstanter Intensität und konstanter Richtung.
2. Periodisch schwankende Spannungen.

Digitized by Google

a) Wellenspannung von schwankender Intensität und konstanter Richtung.

b) Wechselspannung von schwankender Intensität und Richtung.

Unter einer periodischen Spannung versteht man eine sich zeitlich beliebig ändernde Spannung, sobald sie die einschränkende Bedingung erfüllt, daß sie in allen um die gleiche Zeit, die „Periodendauer", auseinanderliegenden Augenblicken gleiche Werte besitzt.

Unter den Wechselspannungen ist die „reine Wechselspannung" ausgezeichnet. Sie erfüllt die weitere Bedingung, daß innerhalb einer Periodendauer die gesamte Wirkung in einer bestimmten Spannungsrichtung gleich ist der gesamten Wirkung in der entgegengesetzten Spannungsrichtung. Die in einer Periode in einer bestimmten Richtung insgesamt ausgeübte Wirkung ist Null. Wie aus den im Artikel „Elektrischer Strom" ausführlich gebrachten Darlegungen hervorgeht, läßt sich jede periodische Spannung in eine Gleichspannung und eine reine Wechselspannung zerlegen.

Die für die Technik wichtigsten Spannungen sind die Gleichspannung und die reine Wechselspannung. Wellenspannungen besitzen geringe Bedeutung, verleiten aber leicht zu fehlerhaften Messungen.

Die Gleichpannung ist durch eine einzige Größe, die Intensität vollkommen definiert. Nicht so die Wechselspannung. Zu ihrer vollständigen Bestimmung gehören: 1. die Intensität, 2. die Kurvenform, 3. die Anzahl Perioden in der Sekunde, kurz die „Frequenz", 4. die Phase, das ist der Schwingungszustand in einem gegebenen Zeitpunkte oder auch der Bruchteil einer Periode, um den die Spannung gegen eine andere gleicher Frequenz verschoben ist. Alle diese Größen müssen ermittelt werden, wenn eine Wechselspannung vollständig bekannt sein soll.

Für die meisten Zwecke genügt es jedoch, die Intensität der Spannung zu kennen. Für andere Zwecke ist außerdem noch eine allgemeine Charakterisierung der Kurvenform erwünscht. Diese ergibt sich aus der Ermittelung des Scheitelfaktors und des Formfaktors (siehe den Artikel „Elektrischer Strom").

Daraus ergibt sich die folgende Einteilung der Messung von Wechselspannungen:

1. Messung der Intensität.
2. Messung des Scheitelfaktors und des Formfaktors.
3. Messung der Kurvenform.

Bei der Definition der mittleren Intensität einer Wechselspannung könnte man zunächst daran denken, diese als Mittelwert aus sämtlichen Einzelwerten der Spannung während einer Periode ohne Rücksicht auf das Vorzeichen zu definieren. Die so erhaltene Intensität nennt man die „mittlere Intensität" e_m. Sie hat nur geringe Bedeutung. Ein anderer Weg der Definition besteht darin, daß man sagt, als mittlere Intensität soll diejenige konstante Intensität (Gleichspannung) angesehen werden, die während der Zeitdauer einer Periode dieselbe Wirkung (Erwärmung, Kraftwirkung) hat, wie eine Periode der Wechselspannung.

Nun ist die Energie, die durch eine Gleichspannung e_g in einem Widerstande r in Wärme verwandelt wird, gleich $\frac{e_g^2}{r}$. Um also die mittlere von einer Wechselspannung e_w in dem gleichen Widerstande entwickelte Wärmemenge zu erhalten, muß aus sämtlichen Augenblickswerten $\frac{e_w^2}{r}$ das Mittel genommen werden. Mathematisch schreibt man das Mittel aus n Einzelwerten $\frac{e_g^2}{r}$

$$\frac{1}{n}\sum_0^n \frac{e_g^2}{r}.$$

Diese Wärmemenge soll gleich der durch die Gleichspannung entwickelten Wärmemenge sein. Es ist also

$$\frac{e_g^2}{r} = \frac{1}{n}\sum_0^n \frac{e_w^2}{r}$$

oder

$$e_g^2 = \frac{1}{n}\sum_0^n e_w^2$$

$$e_g = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_0^n e_w^2}$$

Das heißt, man erhält diesen auf gleicher Wirkung beruhenden Mittelwert einer Wechselspannung, wenn man sämtliche Augenblickswerte in das Quadrat erhebt, daraus das Mittel nimmt und aus dem Mittel die Wurzel zieht. Man nennt den so erhaltenen Wert „Effektivwert der Spannung". Dieser Mittelwert besitzt in der Technik die größte Wichtigkeit. Er wird von allen Meßinstrumenten angegeben.

3. Die Einheiten der Spannung. Da das Maß die Grundlage der Messungen ist, dürfte es angebracht sein, vor der Besprechung der Spannungsmessungen die Einheiten der Spannung kurz zu behandeln.

Als die Einheiten der Elektrizität festgelegt wurden, war das Elektron noch nicht entdeckt, und es bestand noch die Hoffnung, die elektromagnetischen Erscheinungen restlos mechanisch erklären zu können. Deshalb trug man kein Bedenken, die elektromagnetischen Einheiten durch die mechanischen der Länge, Masse und Zeit zu definieren. Und zwar wurden zwei Maßsysteme, das elektrostatische und das elektrodynamische,

Digitized by Google

aufgestellt, die durch die Lichtgeschwindigkeit miteinander verknüpft sind.

Dem elektrostatischen Maßsystem wurde das Coulombsche Gesetz

$$k = f\,\frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_1}{r^2}$$

zugrunde gelegt, nach dem sich zwei Elektrizitätsmengen ε und ε_1 gleichen Vorzeichens, die um die Länge r voneinander entfernt sind, mit der Kraft k abstoßen. f ist ein Proportionalitätsfaktor, der verschwindet, wenn alle Größen im gleichen Maßsysteme gemessen werden. Dieses Maßsystem ergab sich aus der Festsetzung: Die elektrostatische Einheit der Elektrizitätsmenge ist diejenige, welche eine ihr gleiche Menge aus der Entfernung 1 (cm) mit der Kraft 1 (Dyne) abstößt. Die elektrostatische Einheit der elektrischen Feldstärke ist diejenige, in welcher auf die Elektrizitätsmenge 1 die Kraft 1 ausgeübt wird. Die Einheit des Potentiales ist dasjenige Potential, welches im Abstande 1 von der Elektrizitätsmenge 1 herrscht. Die Einheit der Potentialdifferenz oder der Spannung ist zwischen zwei Punkten vorhanden, wenn die Kraft 1 aufgewendet werden muß, um die Einheit der Elektrizitätsmenge von dem einen Punkte zum anderen zu bringen.

Das elektrostatische Maßsystem wird nur in wenigen Gebieten der wissenschaftlichen Elektrophysik benutzt.

Ueberall, wo es sich um strömende Elektrizität handelt, insbesondere in der Technik, wird das elektromagnetische Maßsystem angewandt. Dieses geht von der Stromstärke aus: Die Einheit des Stromes ist derjenige Strom, dessen Längeneinheit aus der Entfernung 1 die Kraft 1 ausübt (näheres siehe im Artikel „Elektrischer Strom"). Die Einheit der Elektrizitätsmenge ist die vom Strom 1 in der Zeiteinheit durch einen Querschnitt der Leitung beförderte Menge. Die Einheit der Spannung ist zwischen zwei Punkten vorhanden, wenn die Arbeit 1 aufgewendet werden muß, um die Elektrizitätsmenge 1 vom einen Punkte zum anderen zu bringen.

Das ist ganz dieselbe Definition wie im elektrostatischen Maßsysteme. Aber hier ist die Einheit der Elektrizitätsmenge 3.10^{10} mal so groß als im elektrostatischen Maßsysteme. Folglich ist die elektromagnetische Einheit der Spannung gleich dem $\frac{1}{3.10^{10}}$ fachen der elektrostatischen. 3.10^{10} cm/sec aber ist die Größe der Lichtgeschwindigkeit.

Eine andere gleichwertige Definition der Spannung ergibt sich aus dem Induktionsgesetze: In einem Magnetfelde von der Stärke 1 wird ein gerader, zur Feldrichtung senkrechter Leiter mit der Geschwindigkeit 1 cm/sec senkrecht zu sich selbst und zur Feldrichtung bewegt. Die hierdurch in jedem Zentimeter des Leiters induzierte elektromotorische Kraft ist gleich der Einheit der Spannung. Oder auch: Bei der Wechselbewegung von Magnetismus und Leiter wird in diesem die elektromotorische Kraft (Spannung) 1 induziert, wenn er in der Zeiteinheit eine Kraftlinie schneidet.

Die so definierten elektromagnetischen Einheiten leiden an zwei schweren Mängeln. Sie lassen sich nur mit großer Mühe verwirklichen und die eine von ihnen ist ganz unbrauchbar klein.

Deshalb benutzt man sie nicht.

Sondern geradeso, wie man als Normallänge nicht den Erdquadranten, sondern das Urmeter in Paris, das dem zehnmillionten Teile des Erdquadranten sehr nahe kommt, gesetzlich festlegte, so legte man auch die elektrischen Einheiten gesetzlich unabhängig vom elektromagnetischen Maßsysteme, aber doch derart fest, daß sie einem dekadischen Vielfachen der elektromagnetischen Einheiten möglichst nahekommen. Da die drei elektrischen Größen Stromstärke, Spannung, Widerstand durch das Ohmsche Gesetz verknüpft sind, durfte man nur zwei von ihnen unabhängig voneinander festlegen. Man entschied sich für die Festlegung von Strom und Widerstand. Daraus ergibt sich als Einheit der Spannung diejenige Spannung, die an den Enden eines Widerstandes 1 (1 Ohm) herrscht, wenn er von der Stromstärke 1 (1 Ampere) durchflossen wird. Diese Spannung heißt ein (gesetzliches) Volt. Sie ist nahezu gleich dem 10^8-fachen der elektromagnetischen Einheit.

Aber auch mit diesen gesetzlichen Einheiten war die Praxis noch nicht zufrieden.

Die Praxis verlangt Einheiten, die sich unverändert aufbewahren lassen. Das ist beim Widerstande in hervorragendem Maße der Fall und auch auf dem Gebiete der Spannung hat man eine Einheit, das Cadmiumnormalelement, geschaffen, die große Konstanz zeigt, während die Aufbewahrung von Stromstärken ihrer Natur nach unmöglich ist. Außerdem ist das gesetzlich vorgeschriebenen Verfahren der Strombestimmung für die Bedürfnisse der Praxis ganz unbrauchbar. Es läßt sich nur im Präzisionslaboratorium unter Aufwendung großer Sorgfalt durchführen. Daß man sich trotzdem für die gesetzliche Festlegung der Stromstärke und nicht der Spannung entschied, hatte seinen Grund darin, daß die Theorie der Strommessung besser geklärt war als die der Spannungserzeugung durch Normalelemente.

Inzwischen hat die Theorie der Cadmiumnormalelemente große Fortschritte gemacht, so daß man das vorschriftsmäßig hergestellte Cadmiumnormalelement als zwar nicht gesetzliches, aber praktisches Span-

Digitized by Google

nungsnormal benutzt. Nach den neuesten sorgfältigsten Messungen besitzt es eine elektromotorische Kraft von 1,0183 Volt bei 20° C. Die Vorschriften für die Zusammensetzung des Elementes wurden durch eine internationale Kommission in London 1910 festgelegt.

Es existieren also folgende Einheiten der Spannung:

1. die elektrostatische Einheit gleich 300 Volt,
2. die elektromagnetische Einheit gleich 10^{-8} Volt,
3. die gesetzliche Einheit gleich 1,0000 Volt,
4. die praktische Einheit, das Cadmiumelement gleich 1,0183 Volt bei 20° C.

4. Die Messung der Spannungen. 4a) Das Kompensationsverfahren. Bei den Spannungsmessungen unterscheidet man das direkte Verfahren, das aus den von der Spannung ausgeübten Kräften auf ihre Größe schließt, das indirekte, das die Größe des elektrischen Stromes ermittelt, der von der zu messenden Spannung in einem bekannten Widerstande erzeugt wird, und das Kompensationsverfahren, dessen Prinzip mit den besonderen Eigenschaften der Spannung nichts zu tun hat, sondern zur Messung jeder Größe geeignet ist. Es wird seit Urzeiten in der Wage angewandt und besteht darin, daß man eine in meßbarer Weise veränderliche Größe so lange ändert, bis ihre Wirkung der der zu messenden Größe genau gleich ist, so daß sich die Wirkungen, wenn sie gegeneinander gerichtet werden, genau aufheben.

Das Instrument, welches die Gleichheit der Wirkungen anzeigt, muß der Art der zu messenden Größe angepaßt sein. Während es bei der Wage aus dem Hebel und Zeiger besteht, ist es bei der Spannungskompensation ein elektrisches Instrument, und zwar ein Strommesser hoher Empfindlichkeit, durch den die größere der beiden gegeneinander geschalteten Spannungen so lange Strom sendet, als die Spannungen noch nicht völlig gleich sind. Man kann also das Kompensationsverfahren sowohl den direkten Verfahren zuzählen, da die zu messende Spannung unmittelbar gegen eine bekannte wirkt, als auch den indirekten, da die Spannungsgleichheit mit Hilfe des Stromes ermittelt wird.

Am besten aber behandelt man es als „Prinzip der Abgleichung" für sich. Da es von allen Meßverfahren bei weitem das genaueste ist, so möge es hier an erster Stelle beschrieben werden.

Das einfachste Schema des Kompensationsverfahrens ist in Figur 1 dargestellt. Eine möglichst konstante elektromotorische Kraft E ist durch einen Schleifdraht s und einen Regulierwiderstand r geschlossen (Batteriekreis). Von dem Schleifkontakte a und dem festen Punkte b ist ein Stromkreis abgezweigt, der die zu messende Spannung (oder elektromotorische Kraft) e und ein Galvanometer g enthält (Galvanometerkreis). Der von der Batterie E im Batterie-

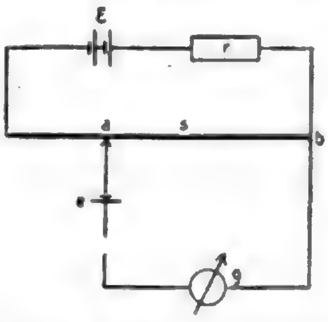


Fig. 1. Schema des Kompensationsverfahrens.

kreise erzeugte Strom wird mit Hilfe des Widerstandes r so eingerichtet, daß in jedem Zentimeter des Schleifdrahtes ein bestimmter bekannter Potentialabfall stattfindet, falls im Galvanometerkreise kein Strom fließt. Man kann also durch Verschieben des Schleifkontaktes a jede beliebige Spannung zwischen Null und der Gesamtspannung des Schleifdrahtes zwischen a und b legen. Man schaltet nun die Pole von e in dem Richtungssinne ein, daß die Spannung e der Spannung a b entgegenwirkt, und verschiebt a so lange, bis das Galvanometer g Stromlosigkeit anzeigt. Dann ist die Spannung e gleich der unmittelbar aus der Länge der Strecke a b ablesbaren Spannung zwischen a und b.

Der Schleifdraht ist für Präzisionsmessungen viel zu ungenau. An seine Stelle treten zahlreiche Präzisionswiderstände, die mit höchster Sorgfalt abgeglichen sind. Der Schleifkontakt wird durch Kurbelschalter ersetzt. Immerhin läßt sich aus dem Schema der Figur 1 ableiten, welche Bedingungen erfüllt sein müssen, damit die Einrichtung genau arbeitet. Da ist abgesehen von der selbstverständlichen Forderung, daß alle Widerstände den Wert wirklich haben, den sie repräsentieren, die wichtigste Bedingung die, daß der Strom im Batteriekreis konstant ist. Das setzt wiederum voraus, daß die Spannung der Batterie konstant ist und daß sich der Gesamtwiderstand des Batteriekreises weder infolge von etwaiger Erwärmung noch infolge der Einstellung von a in wahrnehmbarem Betrage ändert.

Die Konstanz der Batterie (meistens zwei Akkumulatoren) erreicht man dadurch, daß man sie so groß (z. B. 1 Ampere normale Entladestromstärke) und den Strom im Batteriekreis so klein macht (z. B. 0,0001 Ampere), daß er die Batterie nur verschwindend belastet. Außerdem hält man die Temperatur der Batterie möglichst konstant. Den Strom im Batteriekreis sehr klein zu machen, hat den weiteren Vorteil, daß die Erwärmung des Kompensators

Digitized by Google

durch diesen Strom unschädlich klein bleibt. Die Widerstände selbst sind dann für die höchste Genauigkeit hinreichend konstant. Eine Unsicherheit wird jedoch durch die Uebergangswiderstände in den Kurbelschaltern geschaffen. Diese Unsicherheit ist in Kompensatoren mit hohem Gesamtwiderstande (z. B. 15000 Ohm) belanglos.

Mit solchen Apparaten lassen sich aber auch nur die größeren Spannungen bis herab zu etwa 0,001 Volt messen. Sollen wesentlich kleinere Spannungen bis zu 0,0000001 Volt oder 0,1 Mikrovolt kompensiert werden, so muß der Gesamtwiderstand des Kompensators klein sein, weil sonst der Strom im Galvanometerkreis so klein wird, daß er das Galvanometer nicht mehr genügend beeinflußt. Deshalb gibt man den Kompensatoren, die so geringe Spannungen messen sollen, etwa 10 Ohm Gesamtwiderstand. Soll nun die Messung auf ein Zehntausendstel genau sein, so muß der Widerstand bis auf weniger als 0,001 Ohm konstant und bekannt sein. Das ist aber schon in der Nähe des Betrages, den Uebergangswiderstände von Kurbelkontakten zu besitzen pflegen. Deshalb müssen in diesem Falle die Kurbeln im Hauptstromkreis selbst ganz vermieden werden.

Eine weitere Bedingung für richtiges Arbeiten des Kompensators ist die, daß die Spannung zwischen a und b lediglich durch den Strom des Batteriekreises erzeugt und nicht durch irgendwelche parasitischen elektromotorischen Kräfte beeinflußt wird, die in den Widerständen oder Kurbeln und den Verbindungen zwischen a und b ihren Sitz haben. Derartige störende Kräfte entstehen als Thermokräfte, wenn verschiedene Metalle aneinandergrenzen und zwischen den verschiedenen Grenzen Temperaturunterschiede bestehen. Beides läßt sich nicht vermeiden. Die Widerstände müssen aus Manganin sein, um einen von der Temperatur unabhängigen Wert zu besitzen, die Kurbeln aus Kupfer oder Messing, um einen möglichst geringen Widerstand zu haben. Temperaturunterschiede entstehen durch die beim Drehen der Kurbeln entwickelte Reibungswärme. Da die Thermokräfte bei 1° C Temperaturunterschied mehrere Mikrovolt betragen, so folgt, daß sie bei Messungen von etwa einem Volt belanglos, bei Messungen von einem Mikrovolt dagegen von größter Bedeutung sind. Deshalb muß bei Kompensatoren geringen Widerstandes, die zur Messung so kleiner Spannungen dienen, die Entstehung von Temperaturunterschieden mit großer Sorgfalt unterdrückt und müssen außerdem die Thermokräfte durch eine besondere Schaltung an Stellen verlegt werden, an denen sie möglichst unschädlich sind.

Theoretisch ist das Kompensationsverfahren zur Messung von Wechselspannungen ebenso geeignet wie zur Messung von Gleichspannungen. Praktisch dagegen scheitert die Messung von Wechselspannungen nach diesem Verfahren daran, daß sich Wechselspannungen nur vergleichen lassen, wenn sie von derselben Quelle stammen, und daß es keine Wechselspannungsquelle von auch nur annähernd so großer Konstanz gibt wie sie ein Akkumulator besitzt, und wie sie zum Konstanthalten des Stromes im Batteriekreise nötig ist.

α) Kompensator nach Feußner. Der erste Kompensator hohen Widerstandes wurde von Feußner angegeben. Die nebenstehende Figur 2 enthält die Schaltung einer Anordnng aus 4 Dekaden von je 9 Widerständen, Hunderten, Zehnern, Ei-

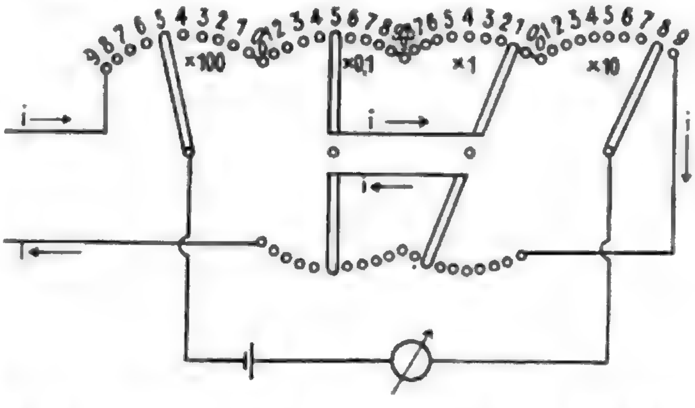


Fig. 2. Schema eines Kompensators nach Feußner.

nern, Zehnteln, zusammen 999,9 Ohm. Zwischen den Kurbeln A und B liegt die Abzweigung zum Galvanometerkreise.

Das Wesentliche an dieser Schaltung sind die beiden mittleren Dekaden. Würden diese ebenso eingerichtet sein wie die Enddekaden, so würde durch Drehen ihrer Kurbeln ein Teil ihres Widerstandes nicht nur aus dem Galvanometerkreise, sondern auch aus dem Batteriekreise ausgeschaltet werden, dessen Widerstand konstant bleiben soll. Um dieses zu erreichen, sind die Dekaden nach dem Zwillingsprinzip ausgebildet. Alle Widerstände sind doppelt vorhanden und jeder Widerstand, der oben ausgeschaltet wird, wird durch eine Doppelkurbel unten in den Batteriekreis (und nur in diesen) wieder eingeschaltet. Daß man als mittlere Dekaden die beiden kleinsten ausgewählt hat, liegt darin begründet, daß dann die Zwillingswiderstände am wenigsten genau abgeglichen zu sein brauchen, da sie dann am wenigsten gegen den großen Gesamtwiderstand des Batteriekreises in Frage kommen. Natürlich werden die kleinsten beiden Dekaden nur elektrisch, der Schaltung nach, in die Mitte genommen. Die räumliche Anordnung der Dekaden ist so, daß die Einstellungen ihrem Stellenwerte nach aufeinanderfolgen. In Figur 2 sind 581,5 Ohm eingestellt. Meistens haben die Kompensationsapparate dieser Art 5 Dekaden, von denen die erste 14 Einheiten besitzt, so daß der Gesamtwiderstand 14 999,9 Ohm beträgt. Die Batterie besteht in der Regel aus zwei Akkumulatoren von

Digitized by Google

rund 4 Volt Spannung. Der Strom im Batteriekreis wird mit Hilfe eines Vorschaltwiderstandes von etwa 25 000 Ohm auf 0,0001 Ampere eingestellt. Dazu schaltet man in den Galvanometerkreis ein Normalelement mit der elektromotorischen Kraft 1,0183 Volt, stellt die Kurbeln des Kompensators auf 10 183 Ohm und verändert mit Hilfe des Vorschaltwiderstandes den Strom im Batteriekreise, bis das Galvanometer Stromlosigkeit anzeigt. Dann ist der Strom im Batteriekreis genau 0,0001 Ampere, 10 000 Ohm des Kompensators entsprechen einem Volt und die Messung unbekannter Spannungen, die an Stelle des Normalelementes eingeschaltet werden, kann beginnen. Die Kontrolle des Batteriestromes muß von Zeit zu Zeit wiederholt werden.

Da Normalelementen unter keinen Umständen Ströme von mehr als etwa 0,00005 Ampere entnommen werden dürfen, ist in den Galvanometerkreis ein ausschaltbarer Vorschaltwiderstand mit den Stufen 100 000; 10 000; 0 Ohm eingeschaltet, der das Normalelement schützt und erst ausgeschaltet wird, wenn die richtige Einstellung nahezu erreicht ist.

β) Kompensator nach Raps. Die nächste Vereinfachung des Kompensators wurde von Raps angegeben. Das Wesentliche an ihr ist das Prinzip des verzweigten Stromkreises. Es besteht darin, daß ein Widerstand, der verändert werden soll, nicht in einzelne ausschaltbare Teile zerlegt wird, sondern statt dessen einen unterteilten Nebenschlußwiderstand erhält. Der Vorteil besteht darin, daß die einzelnen Teile des Nebenschlußwiderstandes einen viel größeren Widerstand erhalten als die Teile eines direkt unterteilten Widerstandes, daß sie infolgedessen leichter abzugleichen sind, und die Uebergangswiderstände der Kurbeln sich zu größeren Widerständen addieren und infolgedessen weniger schädlich sind.

Außerdem kann man bei geeigneter Berechnung der Widerstandsverhältnisse mit viel weniger Widerständen auskommen. So enthält z. B. der in Figur 3 wiedergegebene 4- Dekaden-Kompensator von Raps nur 19 Widerstände von 100 und 19 von 1 Ohm, also zusammen 38, während der Feußnersche insgesamt 54 Widerstände vier verschiedener Größen umfaßt.

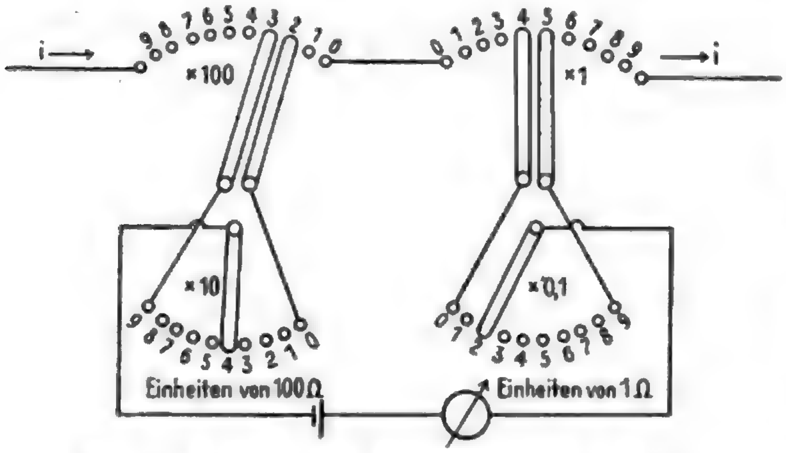


Fig. 3. Schema eines Kompensators nach Raps.

Der Hauptstrom durchfließt bei dem Kompensator von Raps nach Figur 3 hintereinander nur die Hunderter und Einer. Auf den Kontakten beider Dekaden schleifen Doppelkurbeln, deren Bürsten immer einen Widerstand überbrücken. An diesen beiden Bürsten, also dem überbrückten Widerstande parallel, liegen die beiden Nebenschlußdekaden, die ebenfalls aus Hundertern und Einern bestehen. Der Widerstand dieser Verzweigung für den Hauptstrom beträgt 90 oder 0,9 Ohm. Jede Einheit der Nebenschlußdekaden bedeutet nur den zehnten Teil ihres Wertes, eben weil sie im Nebenschluß liegt. Somit sind also tatsächlich dem Werte nach auch hier Hunderter, Zehner, Einer, Zehntel vorhanden. Der Gesamtwiderstand des Batteriekreises ist konstant und beträgt 900 (9 Hunderter) + 90 (das überbrückte zehnte Hundert) + 9 (9 Einer) + 0,9 (der überbrückte zehnte Einer) = 999,9 Ohm. Die Abzweigung liegt an den Kurbeln der Nebenschlußdekaden. Zur Einstellung gibt man den Doppelkurbeln eine solche Stellung, daß der Kompensationswiderstand eben noch zu klein ist und stellt dann mit Hilfe der Kurbeln der Nebenschlußdekaden auf genaue Kompensation ein. In der Figur 3 beträgt der Kompensationswiderstand 244,2 Ohm.

Beide Kompensatoren, der nach Feußner sowohl wie der nach Raps haben den Nachteil, daß der Widerstand des Galvanometerkreises veränderlich ist. Infolgedessen ändert sich auch die Empfindlichkeit des Galvanometers, und es besteht keine Proportionalität zwischen seinem Ausschlag und der Abweichung von der Kompensationsstellung, so daß stets auf Stromlosigkeit eingestellt werden muß. Es gewährt jedoch dieselben Vorteile wie bei der Wägung, die letzten Dezimalen nicht durch völlige Abgleichung, sondern mit Hilfe des Ausschlages des Anzeigeinstrumentes zu gewinnen. Die Bedingung dafür ist konstante Empfindlichkeit des Galvanometers und damit konstanter Widerstand des Galvanometerkreises.

Digitized by Google

γ) Kompensator nach Hausrath und Diesselhorst. Diese Bedingung ist bei den Kompensatoren mit kleinem Widerstande zur Messung geringer Spannungen von Hausrath und von Diesselhorst nahezu erfüllt. Außerdem sind bei diesen Kompensatoren Kurbelkontakte im Meßzweige, sowie störende Thermokräfte vermieden. Auch hier wird das Prinzip der Stromverzweigung benutzt, aber in anderer Weise als bei Raps. Der Widerstand im Galvanometerkreis besteht, wie die schematische Figur 4 erkennen läßt, aus einem Mittelteil von großem und zwei anschließenden Seitenstücken von kleinem Widerstande, die, ohne durch Kurbelkontakte unterbrochen zu sein, hintereinandergeschaltet sind. In der Figur 4 sind sie als Schleifdraht gezeichnet. In Wirklichkeit ist der

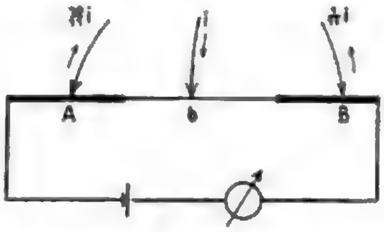


Fig. 4. Schaltung eines Kompensators nach Hausrath und Diesselhorst.

hohe Widerstand eine Mitteldekade aus Einohmwiderständen, die beiden geringen Widerstände zwei Seitendekaden aus Zehnteln. Der Hauptstrom tritt in der Mitte bei C ein und verzweigt sich nach beiden Seiten in zwei ungleiche Teile, die sich wie 10:1 verhalten. Dieses Verhältnis wird mit der erforderlichen großen Genauigkeit durch besondere, in den Batteriekreis eingeschaltete (in Figur 4 nicht eingetragene) Widerstände aufrecht erhalten. Verschiebt man die Kontakte A, B, C so, daß das Galvanometer stromlos wird, so ist die Spannung zwischen A und B gleich $i\left(\frac{10}{11}R_1 - \frac{1}{11}R_2\right)$, wenn R_1 der Widerstand zwischen A und C, R_2 der zwischen B und C ist. Die Widerstände links von C haben also die zehnfache Bedeutung wie die rechts von C. Demzufolge wird durch C die erste und zweite, durch A die dritte und B die vierte Dezimale eingestellt. Der Widerstand des Galvanometerkreises ändert sich dadurch, daß die Stelle, an der der Hauptkreis abzweigt, verschoben wird. Da aber der Widerstand des Hauptkreises groß ist im Vergleich zu dem Widerstande zwischen A und B, so ist die Aenderung des Galvanometerkreises gering. Es können also weitere Dezimalen aus den Galvanometerausschlägen gewonnen werden. Da die Thermokräfte vorwiegend an den Kurbeln infolge der Reibungswärme auftreten, sind sie hier im Galvanometerkreise zugleich mit den Kurbeln vermieden. Außerdem wird der ganze Kompensator zur Erzielung möglichst gleichförmiger Temperatur mit Petroleum gefüllt

δ) Meßbereiche der Kompensatoren und Messung höherer Spannungen mit ihrer Hilfe. Mit Hilfe dieser Kompensatoren lassen sich Spannungen bis 0,1 Volt, mit Hilfe der Anordnung von Feußner Spannungen bis zu einigen Volt durch direkte Einschaltung in den Galvanometerkreis messen.

Zur Messung höherer Spannungen gibt es zwei Wege. Der eine besteht darin, daß die zu messende Spannung an Stelle der Hilfsbatterie eingeschaltet und der von ihr erzeugte Strom durch einen hohen, genau bekannten Vorschaltwiderstand mit Hilfe des Kompensators und eines Normalelementes auf einen runden Wert eingestellt wird. Dann gibt das Produkt aus Stromstärke und dem Gesamtwiderstande des Batteriekreises die gesuchte Spannung.

Bequemer ist das zweite Verfahren, das einen Spannungsteiler verwendet. Dieser besteht aus einem großen Widerstande, der an mehreren Stellen Abzweigklemmen besitzt, etwa derart, daß der Gesamtwiderstand A bis D nach Figur 5 100 000 Ohm, der Widerstand A bis B 100 und der Widerstand A bis C 1000 Ohm beträgt. Wird nun

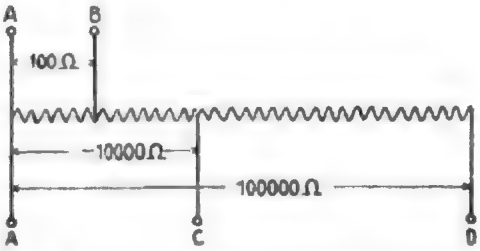


Fig. 5. Schema eines Spannungsteilers.

an AD (oder AC) die zu messende größere Spannung gelegt, so ist an AB genau der tausendste (oder der hundertste) Teil von ihr vorhanden, der sich bequem kompensieren läßt, und das Verhältnis wird auch durch die Kompensation nicht gestört, weil ja bei der Kompensation von der kompensierten Spannung kein Strom geliefert wird. Der Vorteil dieser Methode vor der ersten liegt darin, daß der Hauptstrom im Kompensator nicht neu eingestellt zu werden braucht.

Beiden Methoden gemeinsam ist der Nachteil, daß das Prinzip der Kompensation verlassen ist. Denn bei beiden Methoden wird die Spannung mit Hilfe des von ihr gelieferten Stromes ermittelt. Man kann also nach diesem Verfahren nie elektromotorische Kräfte, sondern immer nur Spannungen messen.

Digitized by Google

4b) **Direkte Spannungsmessung nach dem Elektrometerprinzip.** *α*) **Elektrostatische Elektrometer.** Wie eingangs erwähnt, ist das Kompensationsverfahren oder das Prinzip der Abgleichung nicht in den besonderen Eigenschaften der Spannung begründet, sondern ganz allgemein anwendbar. Das eigentliche Spannungsmeßprinzip besteht darin, aus den von der Spannung ausgeübten Kräften auf ihre Größe zu schließen. Dieses Prinzip ist in den Elektrometern angewandt. Da diese jedoch zum größten Teile in dem Artikel „Elektrostatische Messungen“ ausführlich behandelt sind, kann hier nur kurz auf sie eingegangen werden.

Die Quadrantelektrometer bestehen aus vier leitenden Quadranten, die voneinander sorgfältig isoliert sind und eine geschlitzte Schachtel bilden. Je zwei gegenüberliegende Quadranten sind untereinander leitend verbunden. In der Schachtel schwingt die bisquitförmige Nadel, die zusammen mit einem Ablesespiegel an einem feinen leitend gemachten Faden aufgehängt ist. Legt man zwischen die beiden Quadrantenpaare eine Spannung, wobei das eine von ihnen geerdet ist, und an die Nadel eine konstante Hilfsspannung, so wird die Nadel mit dem Ablesespiegel durch die Anziehungs- und Abstoßungskräfte zwischen ihr und den Quadranten um einen von der Größe der Spannungen abhängenden Winkel gedreht. Die Drehung wird durch einen auf den Spiegel geworfenen Lichtstrahl in vergrößertem Maße angezeigt. Ein anderes Verfahren besteht darin, auch die Nadel an Erde zu legen.

Da die wirkenden Kräfte äußerst gering sind, so sind die Quadrantelektrometer sehr empfindliche Apparate, die eine sehr sorgfältige Behandlung verlangen und erst nach einiger Uebung gemeistert werden. Andererseits läßt sich mit ihnen bei Innehaltung der nötigen Vorsichtsmaßregeln eine große Genauigkeit erreichen.

Die Eichung der Quadrantelektrometer wird mit dem Cadmiumnormalelement ausgeführt. Sie messen ebensogut Gleich- wie Wechselspannungen und geben im letzteren Falle die Effektivwerte.

Zur Messung hoher Spannungen benutzt man das Prinzip des Elektroskopes. Zwei nebeneinander in einer abgeleiteten Metallhülle herabhängende dünne Metallblättchen stoßen einander ab, wenn sie auf ein hohes Potential geladen werden. Die Größe der Abstoßung läßt sich an einer geeichten Skale ablesen. Das Verfahren ist roh.

β) **Das Kapillarelektrometer.** Wichtig zu Messungen kleiner Spannungen bis zu einem Volt ist das Kapillarelektrometer nach Lippmann. Da es in den Abschnitt über elektrostatische Messungen nicht aufgenommen ist, möge es hier genauer beschrieben werden. Es kann nur zur Messung von Gleichspannungen benutzt werden.

Die Grundlage des Kapillarelektrometers ergibt sich aus folgendem Versuche: Eine sehr große und eine sehr kleine, durch den Meniskus eines kapillaren Fadens gebildete Quecksilberoberfläche werden als Elektroden in verdünnte Schwefelsäure gebracht. Werden sie leitend miteinander verbunden, so stellt sich der Quecksilbermeniskus in der Kapillaren auf einen bestimmten Punkt ein. Legt man dann eine Spannung an die Elektroden, so ändert sich die Stellung des Quecksilbers der Spannung entsprechend, solange die angelegte Spannung unter einem Volt bleibt und der Meniskus die negative Elektrode (Kathode) ist.

Dieses eigentümliche Verhalten des Meniskus rührt daher, daß das Quecksilber in einer Kapillaren, die sich oben zu einem Reservoir voll Quecksilber erweitert, durch die Oberflächenspannung gegen die Schwerkraft in die Höhe gehoben wird. Wird eine Spannung an die Zelle gelegt, so polarisieren sich ihre beiden Elektroden und zwar im umgekehrten Verhältnis ihrer Oberflächengröße. Das heißt, es polarisiert sich praktisch nur der Meniskus in der Kapillaren. Die Polarisation besteht darin, daß von dem durch die Spannung negativ geladenen Quecksilber aus dem Elektrolyten positive Ionen angezogen werden und über seiner Oberfläche eine Schicht bilden, wie Figur 6 zeigt. Die entstandene elektrische Doppel-

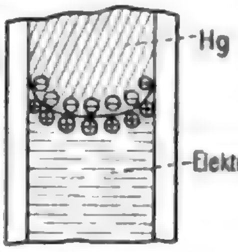


Fig. 6. Elektrische Doppelschicht zwischen Quecksilber und verdünnter Schwefelsäure.

schicht sucht die gekrümmte Fläche des Meniskus zu strecken, weil dann die einander abstoßenden gleichen, dicht nebeneinander liegenden Elektrizitätsteilchen am weitesten voneinander entfernt sind. Die Doppelschicht verringert also die Oberflächenspannung des Quecksilbers und die Folge ist, daß der Meniskus sinkt. Die nebenstehende Figur 7 läßt den Zusammenhang zwischen polarisierender Spannung und Oberflächenspannung erkennen. Die Figur zeigt, daß die Oberflächenspannung ein Maximum besitzt, wenn der Meniskus kathodisch mit 1,0 Volt polarisiert ist. Das bedeutet, daß gerade bei dieser Polarisation keine Doppelschicht vorhanden ist, daß sich also schon beim Eintauchen des Queck-

Digitized by Google

silbers in die Schwefelsäure eine Doppelschicht ausbildet, die einer anodischen Polarisation des Quecksilbers vom Betrage 1,0 Volt entspricht. Diese anodische Polarisation wird durch das Anlegen der gleichgroßen kathodischen Polarisation von einem Volt gerade aufgehoben, so daß dann die maximale Oberflächenspannung vorhanden ist.

Legt man also an die Zelle bis zu einem Volt steigende Spannungen, so steigt die Oberflächenspannung infolge der Schwächung der ursprünglich vorhandenen Doppelschicht und der Meniskus wandert in der Kapillaren in die Höhe.

Für Laboratoriumsarbeiten gibt man dem Kapillarelektrometer am besten die Form der Figur 8. Auf einem Grundbrett ist mit Hilfe eines federnden Metallstreifens ein dünnes Brett befestigt, das durch die Stell-

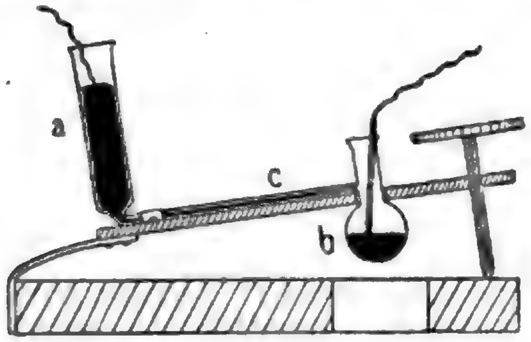


Fig. 8. Kapillarelektrometer.

schraube f nach Belieben geneigt werden kann, und auf dem das eigentliche Elektrometer ruht. Die Quecksilberelektrode mit großer Oberfläche befindet sich in dem Glaskölbchen b, die andere wird in d gefüllt und endet in der mit b verbundenen Kapillaren c. Zur Stromzuleitung dienen Platindrähte. Die Kapillare c soll etwa 0,5 mm lichte Weite haben. Unter ihr liegt eine in halbe Millimeter geteilte Ableseskale. Um das Elektrometer benutzen zu können, schließt man es zunächst kurz, läßt dann einen Tropfen Quecksilber durch c nach b hinübergleiten und stellt darauf die Schraube so ein, daß sich die Grenze zwischen der Quecksilberkuppe und der Schwefelsäure in c am oberen Ende der Skale befindet. Je steiler dabei die Kapillare liegt, um so unempfindlicher ist das Elektrometer, um so geschwinder aber die Einstellung. Die gewünschte Neigung läßt sich bei gegebener Einstellung der Quecksilberkuppe durch Verändern der Quecksilbermenge in d erreichen. Die beste Neigung ist die, bei der 0,01 Volt einen Ausschlag von 3 bis 5 Skalenteilen gibt. Um den Stand der Quecksilberkuppe genau ablesen zu können, befestigt man eine Lupe über der Skale.

Da nach Figur 7 die Ausschläge des Elektro-

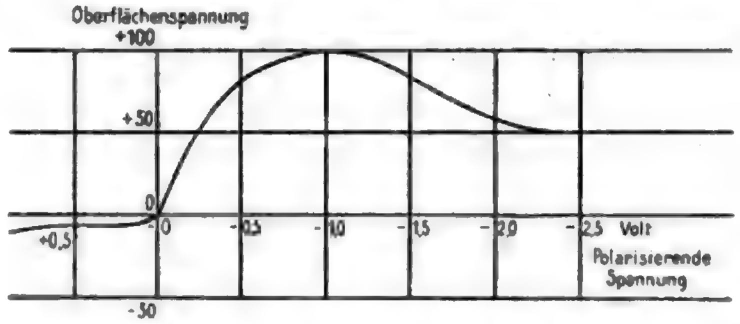


Fig. 7. Kurve der Oberflächenspannung des in verdünnter Schwefelsäure polarisierten Quecksilbers nach Paschen.

meters nur innerhalb enger Grenzen den angelegten Spannungen proportional sind, hat man die Wahl, das Elektrometer entweder mit einer besonderen durch Eichung gewonnenen Skale zu versehen, oder es nur als Nullinstrument zu benutzen. Letzteres ist die Regel. Zu beachten ist ferner, daß das Quecksilber in der Kapillaren unrein und unbeweglich wird, wenn es zur Anode gemacht wird. Ist dieses durch ein Versehen geschehen, so muß ein Tropfen Quecksilber nach b hinübergedrückt werden, damit eine reine neue Oberfläche entsteht. Zwischen den einzelnen Messungen eines Versuches soll es dauernd kurzgeschlossen sein, was sich leicht mit Hilfe eines geeigneten Schalters erreichen läßt.

Für manche Arten von Untersuchungen eignet sich das Kapillarelektrometer wegen seiner großen elektrostatischen Kapazität nicht. Diese rührt daher, daß die Doppelschicht zu ihrer Ausbildung beträchtliche Elektrizitätsmengen beansprucht.

Ferner kommt es überall da nicht in Frage, wo eine hohe Isolation der spannungsführenden Teile gegeneinander gefordert wird, wo also geringe Ladungen längere Zeit erhalten bleiben sollen. Denn das Kapillarelektrometer wird von einem dauernden, wenn auch recht geringen Strome durchflossen, sobald es an Spannung gelegt wird. Das rührt daher, daß die Doppelschicht durch Diffusionsprozesse dauernd geschwächt wird, so daß der Strom immer neue Ionen zu ihrer Aufrechterhaltung herbeischaffen muß.

Das Kapillarelektrometer bildet also den Uebergang zu den stromverbrauchenden Spannungsmeßinstrumenten, wenn auch sein Strom nicht zur Messung benutzt wird, sondern lediglich störend wirkt.

4c) Indirekte Messung von Spannungen aus Stromstärke und Widerstand. Für technische Messungen ist das Verfahren, eine Spannung durch den Strom zu messen, den sie in einem bekannten

Digitized by Google

Widerstande erzeugt, das weitaus verbreitetste und wichtigste. Da jedoch die Messung von Strömen in dem Artikel „Elektrischer Strom“ ausführlich behandelt ist, soll hier, um Wiederholungen zu vermeiden, nur das Prinzip dieser Methode der Spannungsmessung behandelt und im übrigen auf den erwähnten Artikel verwiesen werden.

Zwei Bedingungen müssen erfüllt sein. Der von der zu messenden Spannung an das Meßinstrument gelieferte Strom muß so gering wie möglich sein, damit die Spannung nicht durch die Stromlieferung verändert wird (an Normalelemente dürfen Spannungsmesser dieser Art überhaupt nicht angeschlossen werden!), und der Widerstand des Spannungsmessers muß konstant sein. Beide Bedingungen erfüllt man dadurch, daß man empfindliche Strommesser benutzt, denen man einen hohen konstanten Vorschaltwiderstand gibt. Da bei fast allen Strommessern der Widerstand des messenden Systems selbst zwar nicht konstant, aber recht gering ist, so kommt die durch die Erwärmung des Instrumentes bedingte Aenderung dieses Widerstandes gegenüber dem hohen Vorschaltwiderstande nicht in Frage.

Sollen die Instrumente nur als Spannungsmesser benutzt werden, so werden die Vorschaltwiderstände meistens gleich in das Instrument eingebaut. Sind die Apparate dagegen zur Messung von Spannungen und Strömen bestimmt, so erhalten sie separate Vorschaltwiderstände, die in besonderen Widerstandskästen untergebracht sind. Um Vertauschbarkeit zu ermöglichen, gibt man sämtlichen Strommessern bei gleicher Empfindlichkeit auch gleiche innere Widerstände, so daß bei allen einem gegebenen Widerstande und Ausschlage die gleiche Spannung entspricht. So führt z. B. Siemens & Halske viele Apparate so aus, daß 1000 Ohm 3 Volt entsprechen.

Hohe Wechselspannungen mißt man dadurch, daß man sie mit Hilfe eines Meßtransformators von genau bekanntem Uebersetzungsverhältnisse verkleinert, und die kleinere Spannung nach einem der angegebenen Verfahren ermittelt.

Bezüglich der Aufnahme und Analyse von Wechselspannungskurven muß auf den Artikel „Elektrischer Strom“ verwiesen werden.

Literatur. *1. Umfassende Werke:* ***Heinke,*** *Handbuch der Elektrotechnik. Leipzig 1908.* — ***Abraham,*** *Theorie der Elektrizität. Leipzig 1905.* — ***Kittler,*** *Allgemeine Elektrotechnik. 1909 und 1910.* — ***Kohlrausch,*** *Lehrbuch der Physik. Leipzig-Berlin 1910.* — ***Winkelmann,*** *Handbuch der Physik, Band IV. Leipzig 1905.* — ***Maxwell,*** *Lehrbuch der Elektrizität und des Magnetismus. Berlin 1888.* — *2. Kompensationsverfahren:* ***Diesselhorst,*** *Z. f. Instr., 1906, S. 173 und 297; 1908, S. 1.* — ***Hausrath,*** *daselbst, 1907, S. 309.* — ***W. P. White,*** *daselbst, 1907, S. 210.* — *3. Kapillarelektrometer:* ***Palmaer,*** *Z. f. phys. Chem. 59, S. 187, 1907.*

G. Schulze.

Elektrischer Strom.

1. Definition und Eigenschaften des elektrischen Stromes. 2. Einteilung der Ströme nach Intensität und Richtung. 3. Einheiten des elektrischen Stromes. 4. Messung des elektrischen Stromes. a) Das Meßprinzip der Verzweigung. b) Meßverfahren, mit denen nur Gleichstrom gemessen werden kann. α) Elektrolytische Wirkung des Stromes; Silbervoltameter; Kupfervoltameter; Quecksilbervoltameter; Wasser- oder Knallgasvoltameter. β) Wirkung zwischen Strom und Magneten. 1. Stromleiter beweglich; Drehspulgalvanometer; ballistische Galvanometer; Saitengalvanometer; Drehspulzeigerinstrumente. 2. Magnet beweglich; Nadelgalvanometer, Tangentenbussole. γ) Drehung der Polarisationsebene des Lichtes durch den Strom. c) Meßverfahren, mit denen sowohl Gleichstrom als auch der Effektivwert von Wechselströmen gemessen werden kann. α) Indirekte Methode. Messung von Spannung und Widerstand. β) Wirkung zwischen Strom und weichem Eisen. γ) Wirkung zwischen Strom und Strom. Dynamometrische Strommesser; Stromwagen. δ) Wärmewirkung des Stromes im durchströmten Leiter. 1. Verlängerung des erwärmten Leiters; Hitzdrahtstrommesser. 2. Temperaturerhöhung (gemessen mit Thermoelement). 3. Widerstandserhöhung. 4. Lichtstrahlung. ε) Striktionswirkung des Stromes. d) Meßverfahren, mit denen nur der Effektivwert von Wechselströmen gemessen werden kann. α) Das Induktionsprinzip. β) Das Resonanzprinzip. γ) Das Telephonprinzip. e) Messung und Analyse der Kurvenform von Wechselströmen. α) Die punktförmige Kurvenaufnahme. β) Die Momentaufnahme der vollständigen Kurven. 1. Mit Hilfe freier Elektronen; Braunsche Röhre; Glimmlichtoszillograph von Gehrcke. 2. Mit Hilfe beweglicher Massensysteme; Nadeloszillograph; bifilare Oszillographen; Saitenoszillograph. γ) Messung des Formfaktors. δ) Analyse der Wechselstromkurven.

1. Definition und Eigenschaften des elektrischen Stromes. Als elektrischen Strom bezeichnet man die Bewegung elektrischer Ladungen. Von den elektrischen Ladungen kennt man bisher drei Arten: Erstens die negativen Elektronen oder Atome der Elektrizität, zweitens die positiven Ionen, die durch Abspaltung von Elektronen von gewöhnlichen Atomen entstehen und aus dem zu bestehen scheinen, was man Materie nennt, drittens die negativen Ionen, bestehend aus Atomen, die mit überschüssigen Elektronen beladen sind. Demgemäß lassen

Digitized by Google

sich drei Arten elektrischer Ströme unterscheiden: Der Strom negativer Elektronen, der Strom positiver und der negativer Ionen.

Die Elektronen besitzen eine, wenn auch äußerst kleine träge Masse. Also ist auch ein Elektronenstrom mit Massentransport verknüpft. Aber dieser Massentransport ist mit keiner meßbaren Veränderung der Massenverteilung verknüpft. Da alle Elektronen gleich sind und beim stationären Strome an die Stelle jedes wegströmenden Elektrons ein neues zuströmendes tritt, so ändert sich in dem Zustande des durchströmten Stoffes nichts. Andererseits ist die Anhäufung der Elektronen an einer Stelle bis zu einer meßbaren Masse nicht möglich, weil die einander abstoßenden Kräfte der Elektronen viel zu groß sind.

Der Elektronenstrom findet sich in reiner Form in den Metallen. Die positiven Ionen sind in ihnen praktisch unbeweglich, die Elektronen dagegen wenigstens zum Teil frei. Annähernd rein ist der Elektronenstrom ferner im Kathodenstrahl, der fast ausschließlich aus negativen, mit außerordentlicher Geschwindigkeit von der Kathode abfliegenden Elektronen besteht.

Reiner Ionenstrom fließt in den Elektrolyten und zwar bewegen sich in ihnen im allgemeinen sowohl positive als auch negative Ionen in entgegengesetzten Richtungen mit Geschwindigkeiten, die nicht sehr voneinander abweichen. Doch kommen auch Elektrolyte vor, z. B. erhitztes Glas, in denen die negativen Ionen praktisch unbeweglich sind, und allein die positiven strömen.

Elektrische Ströme in Gasen sind im allgemeinen aus Elektronenströmen und Ionenströmen zusammengesetzt.

Damit ein elektrischer Strom entstehen kann, müssen zweierlei Dinge vorhanden sein, nämlich bewegliche elektrische Ladungen und ein elektrisches Feld, das sie in Bewegung versetzt. Ist die Beweglichkeit der Ladungen begrenzt, etwa dadurch, daß sie elastisch an eine Ruhelage gebunden sind, so kann der Strom nur solange andauern, bis die dem herrschenden elektrischen Felde entsprechende elastische Verschiebung der Elektronen eingetreten ist. Man nennt derartige Ströme deshalb Verschiebungsströme. Sie sind besonders in denjenigen Körpern von Wichtigkeit, in denen fast ausschließlich solche elastisch gebundene Ladungen vorhanden sind, so daß ein merklicher dauernder Strom überhaupt nicht zustande kommen kann. Derartige Körper heißen Dielektrika. Sind außer den elastisch gebundenen noch frei bewegliche Ladungen in vergleichbarer Menge enthalten, so werden die Verschiebungsströme von den Dauerströmen der freien Ladungen überdeckt und entziehen sich der Beobachtung.

Da der elektrische Strom die ihn verursachende Spannung oder Verschiedenheit der Ladungskonzentration an verschiedenen Stellen auszugleichen sucht, so kann dauernder Strom nur dann fließen, wenn eine Vorrichtung vorhanden ist, die die weggeführten Ladungen immer wieder ersetzt. Im anderen Falle entsteht nur ein kurzer, schnell auf Null abnehmender Stromstoß, ein „Entladungs- oder Ausgleichsstrom".

Besteht zwischen zwei Punkten des Raumes eine Spannung, so verteilt sich der durch diese Spannung erzeugte Strom auf den gesamten, die beiden Punkte umgebenden Raum derart, daß die relative Dichte des Stromes an den einzelnen Stellen des Raumes ausschließlich von der Leitfähigkeit des Raumes abhängt. Vollkommene Nichtleiter der Elektrizität gibt es nicht. Schon durch die Erschütterungen, die die Atome und Moleküle durch Wärme- und Lichtstrahlen erfahren, werden stets Elektronen auch aus dem festesten Verbande in Freiheit gesetzt, so daß sie der Wirkung eines elektrischen Feldes nachgeben und einen Strom bilden können. Doch sind im allgemeinen die Unterschiede in den Leitfähigkeiten der besten und der schlechtesten Leiter so groß, daß man für den bequemen Sprachgebrauch zwischen Leitern und Nichtleitern (Isolatoren) unterscheiden darf.

Als das Wesen des elektrischen Stromes in Metallen noch ganz unbekannt war, suchte man es sich anschaulich zu machen, indem man den Strom mit einem Wasserstrome verglich, und es ist erstaunlich, wieviel Eigentümlichkeiten des elektrischen Stromes sich mit diesem Bilde anschaulich machen lassen. Noch weiter kommt man, wenn man alle drei Aggregatzustände des Wassers heranzieht. Als festes Eis gleicht das Wasser den Dielektriken, als flüssiges Wasser der Elektrizität in Metallen oder Elektrolyten, als Dampf den freien Elektronen im Vakuum, die dem Dampfstrahl gleich als Kathodenstrahl mit außerordentlicher Geschwindigkeit dahinschießen. Durch Erhitzung verwandelt man Dielektrika in Leiter, wie Eis in Wasser, durch weitere Erhitzung gewinnt man freie Elektronen aus den Leitern, wie Dampf aus Wasser.

Neuerdings haben aber diese Bilder an Wert verloren, weil man in den Elektronen und Ionen ja ein unmittelbares Bild besitzt, das eine nochmalige Umdeutung zum mindesten überflüssig macht.

Nur für einen Fall, über den viel Unklarheit herrscht, ist der Vergleich mit Wasser wertvoll. Das ist die Geschwindigkeit des elektrischen Stromes. Angenommen eine vollständig mit Wasser gefüllte Wasserleitung hätte 1400 m von ihrer Ausflußöffnung entfernt einen Hahn. Oeffnet man plötzlich den Hahn, so wird etwa nach einer Sekunde das Wasser aus der Ausflußöffnung herauszuströmen beginnen. Trotzdem wird niemand behaupten, die Geschwindigkeit

Digitized by Google

des Wasserstromes sei 1400 m in der Sekunde. Vielmehr pflanzt sich mit dieser Geschwindigkeit lediglich der das Wasser in Bewegung setzende Druck durch die Leitung fort und die Geschwindigkeit des Wassers selbst hat nichts damit zu tun. Sie ist nur davon abhängig, wie weit der Hahn geöffnet wird, wie weit die Leitung und wie groß der Druck ist.

Ganz dasselbe gilt nun für die Elektrizität. Schließt man mit einem Schalter einen sehr langen Stromkreis, so beginnt an einer 1000 m vom Schalter entfernten Stelle der Strom schon nach etwa $^1/_{300000}$ Sekunde zu fließen. Aber diese Zeit hat mit der Geschwindigkeit des elektrischen Stromes gar nichts zu tun, sondern ist ausschließlich durch die Geschwindigkeit von 300000 km/sec gegeben, mit der sich der „elektrische Druck" oder die Spannung fortpflanzt (streng genommen gilt diese Geschwindigkeit nur im Vakuum, in Leitern ist sie beträchtlich geringer). Die Geschwindigkeit, mit der die Elektrizitätsteilchen fortschreiten, ist stets kleiner und zwar in den meisten Fällen ganz außerordentlich viel kleiner. Die folgende Tabelle I enthält die mittleren Geschwindigkeiten für einige charakteristische Fälle des elektrischen Stromes.

Tabelle I.

Strömende Ladung	Mittlere Geschwindigkeit. Zentimeter in der Sekunde
Essigsäureion in Wasser bei 18° C und einer treibenden Spannung von 1 Volt pro cm	0,00036
Wasserstoffion unter den gleichen Bedingungen	0,0032
Elektronen im Kupfer bei 1 Ampere pro qmm (nach der Drudeschen Theorie)	etwa 2,5
Elektronen in einer Metallfadenlampe	etwa 2500
Positive Ionen in den Kanalstrahlen	bis $1,8.10^8$
Langsame Kathodenstrahlen	1.10^9
Schnellste Kathodenstrahlen	1.10^{10}
α-Strahlen radioaktiver Stoffe	$2,0.10^9$
Schnellste β-Strahlen radioaktiver Stoffe	$2,9.10^{10}$
Lichtgeschwindigkeit oder Fortpflanzungsgeschwindigkeit elektrischer Spannung im Vakuum	$3,00.10^{10}$

Eine zweite Unklarheit findet sich gelegentlich bezüglich der Bahn des elektrischen Stromes. Als Faraday und Maxwell die außerordentliche Wichtigkeit der Dielektrika und des leeren Raumes für alle elektrischen Erscheinungen bewiesen hatten, tauchte vielfach die Behauptung auf, die Elektrizität fließe eigentlich gar nicht „im Drahte", sondern im umgebenden Raume und der Draht sei nur eine Art Leitlinie für sie.

Diese Meinung vermengt Wahres mit Falschem. Die Elektrizitätsteilchen, Elektronen oder Ionen, fließen durchaus in dem Leiter. Aber jedes von ihnen ist von einem Kraftfelde umgeben, das erst in der Unendlichkeit verschwindet, und dieses Kraftfeld strömt mit ihnen mit und erzeugt eben die nur im Dielektrikum wahrnehmbare Spannung und die elektromagnetischen Wirkungen. Aehnlich beschreibt ein Planet, wie Jupiter, seine bestimmte Bahn, aber sein Gravitationsfeld wandert mit und stört das ganze Planetensystem. Aber deshalb wird niemand sagen, der Jupiter wandere eigentlich in dem seine Bahn umgebenden leeren Raume. Also die Elektrizität fließt in den Leitern, die Spannung befindet sich im umgebenden Dielektrikum, aber sie fließt nicht, sondern ruht, so lange sie konstant ist.

Andererseits ist es natürlich ebenso falsch zu sagen, die elektrische Energie ströme im Leiter, wie zu behaupten, sie ströme im Dielektrikum. Denn die Energie ist das Produkt aus dem Strome im Leiter und der Spannung im Dielektrikum.

Und man kann doch beim besten Willen dem Produkt aus einem an einer Stelle strömenden und dem an einer anderen Stelle ruhenden Agens nicht eine bestimmte Strömungsbahn zuweisen. Ganz anders wird die Sachlage jedoch, sobald Strom und Spannung nicht mehr konstant sind, sondern schwingen. Dann breitet sich die elektrische Energie wirklich im Raume aus.

2. Einteilung der Ströme nach Intensität und Richtung. Bezüglich der Einteilung der elektrischen Ströme nach ihrer Intensität und Richtung in die drei Gruppen Gleichstrom, Wellenstrom und Wechselstrom sowie bezüglich der Bestimmungsstücke dieser Stromarten gilt ganz dasselbe wie bei der elektrischen Spannung, so daß der Kürze halber darauf verwiesen werden muß. Ehe jedoch auf die Messung dieser Größen eingegangen werden kann, ist ihre Grundlage, nämlich die Einheiten des elektrischen Stromes, kurz zu erörtern.

3. Die Einheiten des elektrischen Stromes. Bezüglich der Einheiten des elektrischen Stromes liegen ganz dieselben Verhältnisse vor, wie bei der elektrischen Spannung. Es gibt eine elektrostatische, eine elektromagnetische, eine gesetzliche und eine praktische Einheit.

Die elektrostatische oder mechanisch gemessene Einheit hat ein Strom, bei welchem in der Zeit eins die Elektrizitätsmenge eins durch den Querschnitt des Leiters fließt ($3,33\ldots10^{-10}$ Ampere). Die Elektrizitätsmenge eins ist diejenige, die eine ihr gleiche im Abstande eins (cm) befindliche Elektrizitätsmenge mit der Kraft eins (Dyne) abstößt.

Die elektromagnetische Einheit hat der Strom, dessen Längeneinheit aus der Entfernung eins auf einen Magnetpol eins die transversale Kraft eins ausübt. Damit überall die Entfernung eins vorhanden ist, muß das wirkende Stromstück zu einem Kreisbogen vom Radius eins um den Magnetpol gebogen sein (10 Ampere). Die Einheit des Magnetpoles ist ebenso wie die der elektrostatischen Elektrizitätsmenge aus der Abstoßung eines gleichen Poles definiert.

Die gesetzliche Einheit der Stromstärke

Digitized by Google

ist diejenige, welche bei gleichbleibender Stärke in der Sekunde unter den vom Bundesrat festgesetzten Versuchsbedingungen 1,118 Milligramm Silber elektrolytisch niederschlägt (vgl. auch den Artikel „Elektrische Maßnormale").

Die gesetzliche Einheit der Stromstärke hat den Mangel, daß sie sich nicht aufbewahren läßt und daß ihre Reproduktion große experimentelle Sorgfalt und Erfahrung fordert. Deswegen wird sie nur selten und nur im Präzisionslaboratorium hergestellt, um mit ihrer Hilfe Widerstandsnormale und Normalelemente nach dem Ohmschen Gesetze zu verknüpfen, die man dann umgekehrt zur praktischen Herstellung der Stromeinheit benutzt.

Man kann also sagen: Die praktische Einheit des Stromes ist diejenige, die an einem Widerstande von 1,0183 Ohm die Spannung des Cadmiumnormalelementes erzeugt.

Die gesetzliche und die praktische Einheit führen den Namen Ampere. Sie sind sehr nahezu gleich dem zehnten Teile der elektromagnetischen Einheit. Die Einführung einer besonderen gesetzlichen Einheit war ebenso wie bei der Spannung nötig, weil die Reproduktion der elektromagnetischen Einheit zu schwierig und vor allem zu unsicher ist und weil es außerdem unzulässig ist, daß sich die Grundlage aller elektrischen Messungen mit jeder Neubestimmung verschiebt. Mindestens zwecklos war es jedoch, den zehnten Teil der elektromagnetischen Einheit statt der Einheit selbst als gesetzliche Einheit festzulegen. Es rührt daher, daß größere Ströme erst wenig gebraucht wurden, als man das Ampere definierte.

4. Die Messung des elektrischen Stromes. Zur Messung des elektrischen Stromes lassen sich seine sämtlichen Wirkungen benutzen und die meisten von ihnen werden auch wirklich dazu benutzt. Man kann sie in drei Gruppen einteilen. Die der ersten Gruppe werden nur durch Gleichstrom, die der zweiten durch Gleich- und Wechselstrom, die der dritten nur durch Wechselstrom erzeugt.

Ausschließlich Gleichstrom messen:

1. die elektrolytische Stromwirkung; 2. die Wirkung zwischen Strom und Magnet; 3. die Drehung der Polarisationsebene des Lichtes durch den Strom.

Gleichstrom und Wechselstrom messen:

1. die indirekte Methode der Messung der vom Strome an einem bekannten Widerstande erzeugten Spannung; 2. die Wirkung zwischen Strom und weichem Eisen; 3. die Wirkung zwischen Strom und Strom (Dynamometer; Stromwagen); 4. die Wärmewirkung des Stromes, a) Drahtverlängerung, b) Thermoelektrische Wirkung, c) Widerstandserhöhung, d) Lichtstrahlung des erhitzten Stromleiters; 5. Striktionswirkung des Stromes.

Ausschließlich Wechselstrom messen:

1. das Induktionsprinzip; 2. das Prinzip der Resonanzschwingungen; 3. das Prinzip der erzwungenen Schwingungen (Telephonprinzip).

4a) Das Meßprinzip der Verzweigung. Der Beschreibung der verschiedenen Strommeßverfahren ist ein allgemeines Meßprinzip voranzustellen, das ähnlich dem für Spannungsmessungen wichtigen Kompensationsprinzip mit den besonderen Eigenschaften des Stromes nichts zu tun hat. Es ist das sog. Verzweigungsprinzip und besteht darin, daß nicht der gesamte zu messende Strom, sondern nur ein bekannter Teil von ihm durch das Meßinstrument geleitet wird. Stehen einem Strome mehrere Wege gleichzeitig zur Verfügung, so verteilt er sich im Verhältnis der Leitfähigkeiten, oder im umgekehrten Verhältnis der Widerstände auf diese Wege. So verteilt sich der Strom J in Figur 1 auf den Weg AD den

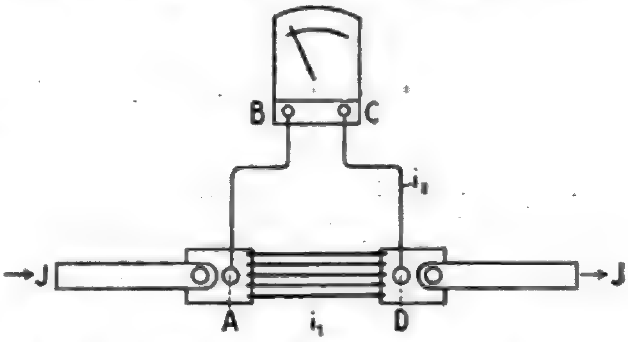


Fig. 1. Prinzip der Stromverzweigung.

„Nebenschlußwiderstand" und den Weg ABCD, den Meßkreis derart, daß $\frac{i_1}{i_2} = \frac{R}{r}$, wenn r der Widerstand des Nebenschlusses zwischen den Punkten A und D und R der gesamte Widerstand der Strecke ABCD ist.

Eine Umformung der Gleichung ergibt

$$\frac{i_1 + i_2}{i_2} = \frac{J}{i_2} = \frac{R + r}{r}$$

$$J = i_2 \cdot \frac{R + r}{r}$$

Man wählt das Verhältnis von R zu r meistens so, daß $\frac{R + r}{r}$ einen dekadischen Wert (10, 100, 1000 usw.) erhält. Setzt man z. B. $r = \frac{1}{9} R$, so wird $\frac{R + r}{r} = 10$. Setzt man $r = \frac{1}{99} R$, so wird $\frac{R + r}{r} = 100$ usw.

Es darf jedoch nie vergessen werden, daß

Digitized by Google

R der Widerstand des gesamten Kreises ABCD ist. Dieser Widerstand besteht aus: 1. dem Widerstande der Zuleitungsschnüre AB und CD. Da er im allgemeinen gegen den Widerstand des Instrumentes nicht zu vernachlässigen ist, so zeigt das Instrument nur dann richtig, wenn es mit seinen zugehörigen Schnüren angeschlossen wird;

2. dem Uebergangswiderstande an den Kontaktstellen B und C. Dieser muß durch sorgfältige Säuberung der Kontakte und festes Anziehen der Schrauben stets so gering wie möglich gemacht werden, so daß er zu vernachlässigen ist;

3. dem Widerstande des Instrumentes selbst.

Da die Strommessung nur solange richtig bleibt, als sich das Verhältnis R:r nicht ändert, so müssen sowohl R als auch r konstant, d. h. von der Temperatur unabhängig sein, da beide durch den Strom ganz verschieden stark erhitzt werden. Man erreicht das bei r, indem man den Nebenschlußwiderstand aus Manganin herstellt und bei R dadurch, daß man dem eigentlichen messenden Systeme, dessen Widerstand nicht konstant sein kann, weil es aus einem Materiale mit Temperaturkoeffizienten hergestellt werden muß (s. die verschiedenen Strommesser), einen hohen konstanten Vorschaltwiderstand gibt, gegen den die Aenderungen des niedrigen Widerstandes des Systems nicht in Frage kommen. Man kann dieses um so leichter erreichen, als ja R ein Vielfaches von r, also groß sein soll (vgl. auch Artikel „Elektrischer Widerstand").

Wenn nach dem Verzweigungsprinzip Wechselstrom gemessen werden soll, müssen auch die Wechselstromwiderstände r′ und R′ in einem gegebenen Verhältnisse stehen. Am besten wird das dadurch erreicht, daß die den Widerstand erhöhende Selbstinduktion in beiden Kreisen so gering gemacht wird, daß ihr Einfluß vernachlässigt werden kann, daß also die Wechselstromwiderstände gleich den für Gleichstrom gültigen Widerständen bleiben.

Das Instrument erhält durch seinen konstanten Gesamtwiderstand den Charakter eines Spannungsmessers, so daß man die beschriebene Strommessung vielfach als Zurückführung einer Strommessung auf eine Spannungsmessung bezeichnet. Mit Unrecht, denn wenn weiter nach dem Charakter der hier angewandten Spannungsmessung gefragt wird, so lautet die Antwort: Zurückführung der Spannungsmessung auf eine Strommessung, eine Sachlage, die zu dem Satze geführt hat, (fast) jeder Strommesser ist ein Spannungsmesser (insofern er im Nebenschluß liegt) und jeder Spannungsmesser ist ein Strommesser (insofern der ihn durchfließende Strom den Ausschlag erzeugt).

Eine indirekte Strommessung ist dagegen die weiter unten beschriebene Kompensation der in einem Normalwiderstande erzeugten Spannung. Zur Messung starker Wechselströme wird statt der Stromverzweigung die Stromtransformation benutzt. Ein sorgfältig konstruierter, von der Belastung möglichst unabhängiger „Meßtransformator" verwandelt den starken Strom in einen schwächeren, der dem Meßinstrument zugeführt wird. Aus dem von diesem angezeigten Werte und dem Uebersetzungsverhältnis des Transformators ergibt sich die gesuchte Stromstärke.

4b) Meßverfahren, mit denen nur Gleichstrom gemessen werden kann. α) Elektrolytische Wirkung des Stromes; Voltameter. Nach dem Faradayschen Gesetze ist die an den Elektroden eines Elektrolyten aufgelöste oder abgeschiedene Substanzmenge der durch den Elektrolyten gewanderten Elektrizitätsmenge proportional. Diejenige Gewichtsmenge eines Körpers, die durch die Einheit der Elektrizitätsmenge abgeschieden wird, heißt das elektrochemische Aequivalent E des Körpers. Ermittelt man außer der abgeschiedenen Menge m eines Körpers von bekanntem elektrochemischen Aequivalente die Zeit t, in der die Abscheidung stattfand, so erhält man die mittlere oder bei konstanten Strom die Stromstärke i selbst aus der Gleichung:

$$i = \frac{m}{t.E}$$

Darin, daß die Voltameter auch bei vollständig unregelmäßig schwankenden Gleichströmen die mittlere Stromstärke richtig messen, liegt ihr großer Wert. In vielen Fällen ist eine einigermaßen genaue Messung derartiger Ströme nach anderen Meßmethoden schlechterdings unmöglich. Doch haften dem Verfahren in den meisten Fällen so zahlreiche Fehlerquellen an, daß es trotz der ungeheueren Mannigfaltigkeit elektrolytischer Kombinationen nur wenige gibt, die eine genaue Messung zulassen.

Die hauptsächlichsten Fehlerquellen sind, daß sich rein chemische Vorgänge über die elektrolytischen lagern und daß die Ionen vieler Substanzen je nach unkontrollierbaren Umständen eine größere oder geringere Anzahl von elektrischen Ladungseinheiten aufnehmen, so daß der gleichen Substanzmenge bald eine größere, bald eine geringere Elektrizitätsmenge entspricht.

Silbervoltameter. Wohl das genaueste Verfahren ist die Erzeugung eines Silberniederschlages aus einer Lösung von Silbernitrat im Silbervoltameter, weshalb dieses Verfahren ja auch zur Festlegung der gesetzlichen Einheit des Stromes diente. Die Anode des Silbervoltameters ist reines Silber, der Elektrolyt eine Lösung neutralen Silbernitrates, die Kathode ein Platintiegel, der zugleich den Elektrolyten und die Anode

Digitized by Google

aufnimmt. Unter der Anode hängt ein Glasschälchen, damit keine Teile von ihr in den Tiegel fallen können. Nachdem die Kathode durch sorgfältigstes längeres Waschen von den letzten Spuren des Elektrolyten befreit und im Trockenkasten bei 150° C getrocknet ist, wird sie mit ihrem Niederschlag gewogen und der Niederschlag aus der Differenz dieser Wägung gegen die Wägung der reinen Kathode vor Beginn des Versuches bestimmt. Das elektrochemische Aequivalent des Silbers beträgt 1,118. Die Stromdichte soll an der Kathode unter 0,02 Amp/qcm, an der Anode unter 0,2 Amp/qcm bleiben. Die Temperatur hat keinen merkbaren Einfluß auf die abgeschiedene Menge. Dagegen kann in sauerstofffreier Umgebung (Vakuum), bei schwachem Ansäuern und bei wiederholtem Gebrauch derselben Lösung ein zu großer Niederschlag entstehen.

Kupfervoltameter. Nicht ganz so genau wie das Silbervoltameter, aber wegen der billigeren Materialien besonders für größere Ströme geeignet ist das Kupfervoltameter. Der Elektrolyt soll in bezug auf $CuSO_4$ und H_2SO_4 normal sein, d. h. 250 g kristallisiertes Kupfersulfat und 100 g konzentrierte Schwefelsäure sollen mit so viel Wasser (Vorsicht!) versetzt werden, daß ein Liter Flüssigkeit entsteht. Ein Zusatz von 5% Alkohol wird empfohlen. Die Anoden, die am besten zu beiden Seiten der Kathode und in gleichem Abstande von ihr angebracht werden, bestehen aus reinem Kupfer. Die Kathode kann aus Kupfer oder auch aus Platin hergestellt sein. Sie soll vollständig in den Elektrolyten eintauchen. Gemessen wird die Gewichtszunahme der Kathode, die unmittelbar nach dem Ende des Versuches abgespült und dann rasch zwischen Fließpapier und unter der Luftpumpe im Exsikkator getrocknet wird. Das Kupfer wird zweiwertig niedergeschlagen. Sein elektrochemisches Aequivalent beträgt 0,3294. Die Stromdichte an der Kathode soll nicht größer als 0,04 Amp./qcm sein. Die Genauigkeit des Kupfervoltameters ist ein bis zwei Promille.

Quecksilbervoltameter (Stiazähler). Neuerdings wird noch das Quecksilbervoltameter unter dem Namen Stiazähler zur Messung von Elektrizitätsmengen und von Strömen verwandt. Der Elektrolyt besteht aus einer Lösung des komplexen Salzes K_2HgJ_4. Die Anode ist Quecksilber, die Kathode ein Platiniridiumblech. Elektroden und Elektrolyt sind in ein festzugeschmolzenes Glasgefäß eingeschlossen, wie es die Figur 2 erkennen läßt. Das Quecksilber wird zweiwertig (elektrochemisches Aequivalent 1,036) auf der Kathode niedergeschlagen und rinnt von ihr in eine Kapillare hinab, in der sein Stand abgelesen wird. Infolgedessen hängt die Genauigkeit der Messung von der Sorgfalt ab, mit der die Kapillare hergestellt und geeicht ist. Der elektrolytische Vorgang als solcher ist keinen merklichen Fehlern unterworfen. Bei den

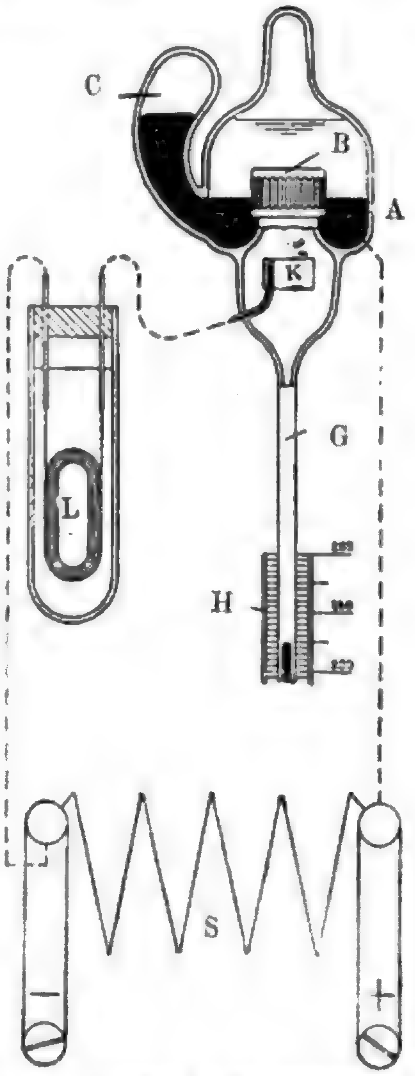


Fig. 2. Schema eines Stiazählers.

empfindlichsten Apparaten, den Laboratoriumstiazählern, durchfließt der gesamte zu messende Strom den Elektrolyten, bei den weniger empfindlichen liegt die elektrolytische Zelle an einem Abzweigwiderstande, durch den der größte Teil des Stromes fließt. In diesem Falle wird der Temperaturkoeffizient der Zelle durch einen Vorschaltwiderstand mit entgegengesetztem Temperaturkoeffizienten kompensiert.

Wasser- oder Knallgasvoltameter. Endlich ist noch das Wasser- oder Knallgasvoltameter zu erwähnen. Reine 10- bis 20 prozentige Schwefelsäure wird zwischen blanken Platinelektroden zersetzt, wozu fast drei Volt nötig sind. Bei schwachen Strömen wird nur der entwickelte Wasserstoff, bei starken das Knallgas als Ganzes aufgefangen. Mit dicht aneinander stehenden Elektroden

Digitized by Google

von etwa je 15 qcm wirksamer Oberfläche können Ströme bis 40 Ampere gemessen werden. Als Elektrolyt wird auch Phosphorsäure von 40% sowie der Billigkeit halber Aetznatronlösung zwischen Nickelelektroden empfohlen. In letzterem Falle ist jedoch Kohlensäure sorgfältig fernzuhalten. Die Genauigkeit soll bei sorgfältiger Behandlung einige Promille betragen.

Der Vorzug des Wasservoltameters ist, daß das entwickelte Gasvolumen in einem geeichten Rohre abgelesen werden kann und keine Wägung nötig ist. Ein Nachteil liegt darin, daß das abgelesene Volumen auf die Temperatur 0° C, den Atmosphärendruck 760 mm und auf trockenes Gas umgerechnet werden muß.

Da das Quecksilbervoltameter von diesem Nachteil frei ist, während es den erwähnten Vorzug teilt, so dürfte es das Wasservoltameter verdrängen.

β) Gleichstrommessung durch Wirkung zwischen Strom und Magneten. Die Richtung, in der ein beweglicher Magnet durch einen Strom, oder ein stromdurchflossener beweglicher Leiter von einem Magneten abgelenkt wird, ist nach der Ampèreschen Regel von der Richtung des Stromes abhängig. Ist der Strom ein Wechselstrom, so suchen seine entgegengesetzten Stromstöße Ablenkungen nach entgegengesetzten Richtungen zu bewirken. Nur in dem Falle, daß die Trägheit des beweglichen Systems so gering ist, daß es den schnellen Schwankungen des Stromes zu folgen vermag, kann das System durch den Wechselstrom in beträchtliche Bewegung und zwar in Schwingungen versetzt werden, in allen anderen Fällen bleibt es in Ruhe. Von dieser einen Ausnahme abgesehen, kann man also mit den Apparaten, die auf der Wechselwirkung zwischen Strom und Magneten beruhen, nur Gleichstrom (oder nur die Gleichstromkomponente eines nicht reinen Wechselstromes) messen.

Auf der Ablenkung eines beweglichen stromführenden Leiters durch einen permanenten Magneten beruhen die Drehspulapparate und das Saitengalvanometer, auf der Ablenkung eines beweglichen Magneten durch den Strom die Nadelgalvanometer und die Tangentenbussole.

1. Stromleiter beweglich; Drehspulgalvanometer. Die empfindlichsten Drehspulapparate sind die Drehspulgalvanometer. Die nebenstehende Figur 3 zeigt ein solches Galvanometer der Firma Siemens und Halske. Die einander nahe gegenüberstehenden Pole eines starken permanenten Magneten enthalten eine zylindrische Bohrung, in der sich ein axialer Eisenzylinder von solchem Durchmesser befindet, daß nur ein schmaler ringförmiger Spalt zwischen ihm und den Magnetpolen frei bleibt. In diesem von den magnetischen Kraftlinien sehr gleichmäßig durchströmten Spalte dreht sich um die Achse des Eisenzylinders die vom Meßstrom durchflossene, auf einen zierlichen Rahmen gewickelte Spule. Ihrer Ablenkung wirkt die Torsion des Fadens entgegen, an dem der Rahmen aufgehängt ist. Um die Torsionskraft des Fadens mög-

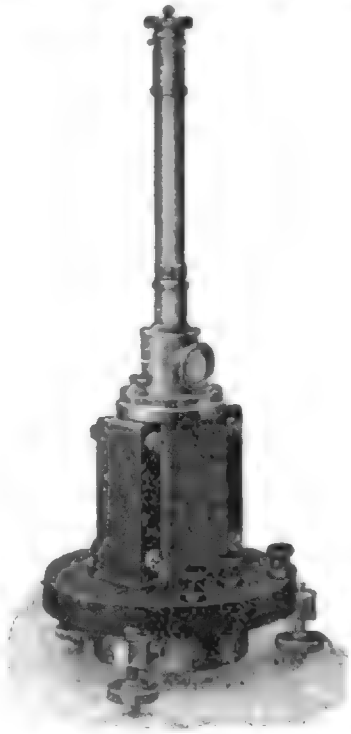


Fig. 3. Drehspulgalvanometer von Siemens und Halske.

lichst gering und damit die Empfindlichkeit des Instrumentes möglichst groß zu machen, wählt man den Faden so dünn wie irgend möglich. Die Grenze ist bei den Drehspulgalvanometern nicht durch die Tragfähigkeit des Fadens, sondern durch die Bedingung gegeben, daß er noch genügend leiten muß, um dem Rahmen den Meßstrom zuführen zu können.

Belastet man die Spule plötzlich mit einer bestimmten Stromstärke, so hat sie das Bestreben, über die der Stromstärke entsprechende Einstellung zunächst hinauszuschwingen und sich erst nach vielen allmählich abnehmenden Schwingungen auf sie einzustellen. Die Schwingungen werden jedoch dadurch „gedämpft“, daß durch die Bewegung der Spule und des Metallrahmens in dem starken Magnetfelde in ihnen Ströme induziert werden, die der Bewegung entgegenwirken. Die Wirkung der in der Spule induzierten Ströme und damit die Dämpfung ist um so stärker, je geringer der gesamte Widerstand des Stromkreises ist, in dem das Galvanometer liegt. Schließt man das

Digitized by Google

Galvanometer kurz, nachdem es ausgeschlagen ist, so wird die Dämpfung so stark, daß es ganz langsam in seine Ruhelage hinein „kriecht". Die günstigste Dämpfung ist diejenige, bei der die Einstellung gerade

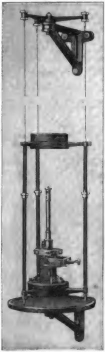


Fig. 4. Julius'sche Aufhängung.

ohne Schwingungen und ohne Kriechen erreicht wird. Man nennt sie die aperiodische Dämpfung.

Die Folge der Aufhängung an einem dünnen Faden ist, daß die Instrumente in gebrauchsfertigem Zustande nicht mehr transportierbar sind. Damit der Aufhängefaden nicht reißt, muß das bewegliche System vor dem Transport durch eine besondere Vorrichtung, die „Arretierung" angehoben und festgeklemmt werden. Ferner sind die Instrumente sehr empfindlich gegen Erschütterungen, so daß sie an einem erschütterungsfreien Platze aufgestellt werden müssen. Ist dieser nicht zu beschaffen, so greift man zu der sogenannten „Juliusschen Aufhängung" (Fig. 4), die Erschütterungen vom Galvanometer fernhält.

Die an sich schon große Empfindlichkeit der Drehspulgalvanometer wird durch das Ableseverfahren noch beträchtlich erhöht. Zur Messung der Ausschläge wird nicht ein körperlicher, sondern gewissermaßen ein Lichtzeiger von 3 bis 4 m Länge benutzt. Der Aufhängefaden trägt oberhalb des beweglichen Systemes einen kleinen Hohlspiegel. Ihm gegenüber in einem Abstande von 1,5 bis 2 m wird eine beleuchtete Skale aufgestellt. Das Bild dieser Skale wird im Spiegel mit Hilfe eines unter der Skale aufgestellten Fernrohres beobachtet. Dreht sich der Spiegel, so scheint die Skale vor dem Fadenkreuze des Fernrohres vorbeizuwandern und sehr geringe Drehungen des Spiegels bewirken bei dem großen Abstande schon große Verschiebungen des Skalenbildes.

Da langdauernde Fernrohrablesungen das Auge angreifen, benutzt man vielfach die etwas weniger genaue aber bequemere objektive Ablesung. Das Licht einer linienförmigen Lichtquelle strahlt durch eine Linse auf den Galvanometerspiegel, der es auf eine transparente Skale zurückwirft, so daß ein scharfes Bild der Lichtquelle auf ihr entsteht.

Gröbere Galvanometer erhalten einen Zeiger, der über einer Skale spielt.

Meistens werden die Galvanometer zu Nullmethoden benutzt, d. h. sie zeigen an, wann in dem Stromkreise, in dem sie liegen, kein Strom mehr fließt. Will man sie zur direkten Messung von Strömen mit Hilfe des von diesen erzeugten Ausschlages benutzen, so muß man ihre u. a. von der Entfernung zwischen Spiegel und Skale abhängige Empfindlichkeit zuvor durch einen besonderen Versuch bestimmen.

Ballistische Galvanometer. Eine besondere Art der Drehspulgalvanometer sind die ballistischen. Sie messen eigentlich nicht Ströme, sondern Elektrizitätsmengen, wie sie durch kurze Stromstöße transportiert werden. Der Stromstoß, der zu Ende sein muß, ehe sich die Spule merklich aus ihrer Ruhelage entfernt hat, erteilt ihr einen Ausschlag, der der Elektrizitätsmenge des Stromstoßes nahezu proportional ist. Da die Dämpfung des ballistischen Galvanometers sehr gering ist, schwingt es nach dem ersten größten Ausschlage mit langsam kleiner werdenden Schwingungen lange Zeit um seine Ruhelage. Aus der Abnahme der Ausschläge läßt sich die Dämpfung und mit ihrer Hilfe, sowie aus der Empfindlichkeit des Galvanometers die den Ausschlag verursachende Elektrizitätsmenge berechnen.

Saitengalvanometer. Ein anderes, auf der Ablenkung eines beweglichen Stromleiters durch einen festen Magneten beruhendes Meßinstrument ist das Saiten-

Digitized by Google

galvanometer. An die Stelle der Spule ist bei ihm ein dünner leitender Faden quer durch ein starkes Magnetfeld gespannt. Die dem Strom proportionale Ausbiegung des Fadens wird mit einem Mikroskope abgelesen oder stark vergrößert auf einen Schirm projiziert. Bei schwacher Spannung eines Fadens von 10000 Ohm Widerstand sollen noch 10^{-12} Ampere wahrnehmbar sein.

Drehspulzeigerinstrumente. Die Verwendung der Galvanometer beschränkt sich fast ganz auf wissenschaftliche Untersuchungen im Laboratorium. Für technische Messungen benutzt man die Drehspulzeigerinstrumente, bei denen zugunsten einer robusteren Konstruktion und guter Transportfähigkeit auf höchste Empfindlichkeit verzichtet ist. Immerhin sind die Drehspulzeigerapparate die empfindlichsten und genauesten aller Zeigerinstrumente. Die stromdurchflossene Spule ist bei ihnen unten auf einer Stahlspitze in einem Achatlager gelagert. Der Ablenkung der Spule durch den Strom wirken Federn entgegen und führen zu einer dem Strome proportionalen Einstellung, die schnell und aperiodisch erreicht wird. Der Spulenrahmen trägt einen sehr leichten Zeiger aus Aluminiumrohr, der mit messerscharfer Schneide über einer sorgfältig gezeichneten Skale mit gleichen Intervallen spielt. Vor der Skale befindet sich zur Vermeidung des Fehlers schiefer Ablesung ein Spiegelstreifen. Man soll so ablesen, daß der Zeiger und sein Spiegelbild sich decken. Die nebenstehende Figur 5 läßt die einzelnen Teile eines Drehspulamperemeters der Firma Weston erkennen.

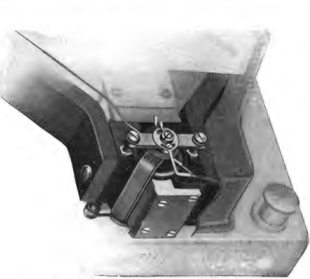


Fig. 5. Drehspulamperemeter der Firma Weston.

Bei den Messungen müssen die Apparate vor der Einwirkung stärkerer äußerer Magnetfelder geschützt werden. Insbesondere dürfen nie zwei Apparate unmittelbar nebeneinandergesetzt werden, da sich dann ihre starken Magnete gegenseitig beträchtlich beeinflussen.

Der Strom, der durch die bewegliche Spule fließt, ist stets sehr gering. Beispielsweise bei Instrumenten der Firma Siemen. & Halske im Maximum 0,05 Amperes Zur Messung größerer Ströme benutzt man das auf S. 287 angegebene Verzweigungsprinzip. Damit jeder Nebenschlußwiderstand mit jedem Strommesser benutzt werden kann, muß der Widerstand des Amperemeterkreises aller Instrumente denselben Wert haben. Meistens wählt man den Wert 1,000 Ohm.

2. Magnet beweglich; Nadelgalvanometer. Die Nadelgalvanometer, die auf der Ablenkung eines beweglichen Magneten durch eine feste stromdurchflossene

Spule beruhen, sind die empfindlichsten Instrumente, die es gibt. Die Empfindlichkeit läßt sich hier viel weiter treiben als bei den Drehspulgalvanometern, weil der Faden, der die äußerst winzigen Magnetnadeln und den Ablesespiegel trägt, keinen Strom zu leiten braucht und deshalb so dünn gemacht werden kann, als es die Tragfähigkeit erlaubt. Meistens ist es ein Kokon- oder ein Quarzfaden.

Würde man nur eine Magnetnadel verwenden, so würde als Richtkraft außer der Torsion des Fadens der Erdmagnetismus wirken, dessen richtende Kraft viel größer ist als die des Fadens, so daß sich keine hohe Empfindlichkeit würde erreichen lassen. Man kombiniert deshalb entweder mehrere Nadeln von gleicher Stärke, aber entgegengesetzt gerichtetem Magnetismus, die auf verschiedenen Seiten der festen Spulen so angeordnet sind, daß der die Spulen durchfließende Strom sie in gleichem Drehsinne, der Erdmagnetismus dagegen in entgegengesetztem Sinne abzulenken sucht. Damit verschwindet die Wirkung des letzteren. Man nennt das Verfahren Astasierung.

Oder man schließt die Nadeln vollkommen in ein mehrfaches Gehäuse weichen Eisens ein, das den Erdmagnetismus abschirmt, und erreicht dadurch noch den weiteren Vorteil, daß das Galvanometer von Störungen durch fremde Ströme und Magnetfelder frei wird. Eine bekannte und gleichzeitig außerordentlich empfindliche Ausführung dieser Art ist das Kugelpanzergalvanometer von Dubois-Rubens (Fig. 6).

Das Ableseverfahren ist bei den Nadelgalvanometern dasselbe wie bei den Galvanometern nach dem Drehspulprinzip.

Um verschiedene Konstruktionen von Nadelgalvanometern miteinander vergleichen zu können. hat man eine „Normalempfindlichkeit" festgesetzt. Man nimmt als Norm an: Einen Drahtquerschnitt, der einen Spulenwiderstand von einem Ohm ergibt, ein richtendes Magnetfeld, das der gegebenen Nadel eine einfache Schwingungsdauer von 5 Sekunden erteilt und einen Skalenabstand von 1000 mm. Der Ausschlag e_0 mm, den der Strom 10^{-6} Ampere unter diesen Umständen geben würde, wenn der Ausschlag als der Stromstärke proportional angenommen wird, heißt Normalempfindlichkeit des Instrumentes.

Besitzt nun ein Instrument bei dem Widerstande r Ohm, der Schwingungsdauer t Sekunden und dem Skalenabstande A die Empfindlichkeit $e \frac{\text{mm}}{10^{-6}\text{ Ampere}}$, so ist seine Normalempfindlichkeit

$$e_0 = e \cdot \frac{1}{\sqrt{r}} \cdot \frac{5^2}{t^2} \cdot \frac{1000}{A}$$

Proportionalität zwischen Strom und Ausschlag besteht nur für kleine Ausschläge. Die Grenze reicht im allgemeinen um so weiter, je kürzer die Nadel und je weiter die Spule ist.

Tangentenbussole. Die Tangentenbussole, die auf demselben Prinzipe beruht, wie die Nadelgalvanometer, ist durch diese längst überholt und fristet hauptsächlich in Sammlungen und konservativen Lehrbüchern ein stilles Dasein. Sie besteht aus einem frei drehbaren Magneten und einer oder

Fig. 6. Kugelpanzergalvanometer nach Dubois-Rubens.

einigen ihn in weiterem Abstande umgebenden Drahtwindungen. Die Windungsebene soll im magnetischen Meridiane stehen. Die ablenkende Kraft des Stromes und die richtende Kraft des Erdmagnetismus führen die Nadel zu einem Einstellungswinkel, dessen Tangens der Stromstärke proportional ist.

γ) Gleichstrommessung durch Drehung der Polarisationsebene des Lichtes. Als letzte Methode, nach der nur Gleichstrom gemessen werden kann, möge die Drehung der Polarisationsebene des Lichtes beim Durchgang durch eine im Magnetfelde des Stromes befindliche Flüssigkeit erwähnt werden. Am besten eignet sich Schwefelkohlenstoff. Die Methode ist nur für starke Ströme anwendbar, aber wegen ihrer Einfachheit zu empfehlen.

4c) Meßverfahren, mit denen sowohl Gleichströme als auch der Effektivwert von Wechselströmen gemessen werden kann. Sämtliche Apparate, die Effektivwerte (vgl. den Artikel „Elek-

Digitized by Google

trische Spannung“) von Wechselströmen messen, besitzen einen gemeinsamen Nachteil, der in der Natur des Effektivwertes begründet liegt. Bei allen ist nämlich die Wirkung des Stromes oder der Ausschlag dem Quadrate des Stromes proportional. Sie erhalten also alle eine quadratisch geteilte Skale und sind in der Nähe des Nullpunktes ganz unempfindlich.

α) Indirekte Methode. Messung von Spannung und Widerstand. Unter den zahlreichen Methoden, nach denen sich sowohl Gleich- als auch Wechselstrom und zwar dessen Effektivwert messen läßt, ist die indirekte Methode, den Strom durch die Spannung zu messen, die er in einem bekannten Widerstande erzeugt, bei weitem die genaueste, wenn die Spannung durch Kompensation oder bei Wechselstrom elektrometrisch gemessen wird. Der Grund liegt darin, daß die zu den Messungen benutzten Normalwiderstände (vgl. die Artikel „Elektrische Maßnormale“ und „Elektrischer Widerstand“) außerordentlich konstant und genau bekannt sind und andererseits die erwähnten Spannungsmeßmethoden zu den besten Meßmethoden überhaupt zählen. Die Normalwiderstände gleicht man so genau wie möglich auf Zehnerpotenzen ab, so daß sich die Ströme aus den kompensierten Spannungen ohne Umrechnungsfaktoren ergeben.

Bei Wechselstrom müssen die Normalwiderstände selbstinduktions- und kapazitätsfrei sein, wenn der mit Hilfe von Gleichstrom ermittelte Widerstandswert auch für den Wechselstrom gültig sein soll. Ferner darf nicht außer Acht gelassen werden, daß bei Wechselstrom die Spannung zwischen zwei Punkten nicht mehr unabhängig von dem Wege ist, auf dem sie dem Meßinstrumente zugeführt wird. Deshalb ist die Abzweigung der Spannung vom Normalwiderstande zum Elektrometer so zu führen, daß in ihr keine zusätzlichen elektromotorischen Kräfte erzeugt werden. Das heißt, der gesamte Stromkreis, in dem sich das Elektrometer befindet, muß selbstinduktionsfrei sein. Die nebenstehende Figur 7 gibt an, wie das neuerdings erreicht wird. Der Normalwiderstand besteht aus einem geraden, vom Kühlwasser durchflossenen Manganinrohre. An den Punkten A und B wird die Spannung abgenommen. Das in A abgenommene Potential wird durch das konzentrische Rohr bis nach C unmittelbar neben B zurückgeführt. Von C und B aus gehen die unmittelbar nebeneinanderliegenden Leitungen zum Elektrometer. Auf diese Weise ist der Elektrometerkreis fast vollkommen bifilar, also selbstinduktionsfrei gemacht.

Bezüglich der Ausführung der Spannungsmessungen muß auf den Artikel „Elektrische Spannung“ verwiesen werden.

β) Wirkung zwischen Strom und weichem Eisen. Während sich die Wirkung zwischen dem Strom und einem permanenten Magneten nicht zur Messung von Wechselströmen verwenden läßt, kann die Wirkung zwischen Strom und weichem

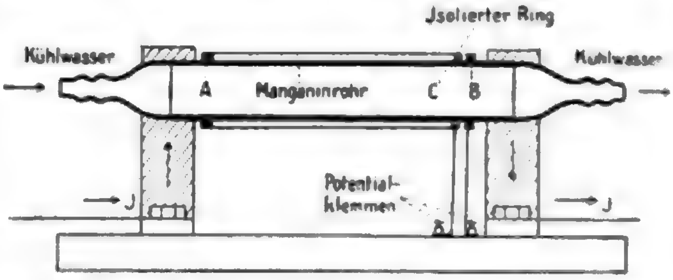


Fig. 7. Selbstinduktions- und kapazitätsfreier Normalwiderstand.

Eisen, da sie lediglich in einer Anziehung des Eisens durch das Magnetfeld des Stromes unabhängig von dessen Richtung besteht, zur Messung von Gleichstrom und von Wechselstrom benutzt werden.

Die anziehende Kraft zwischen dem Eisen und einer vom Meßstrom durchflossenen Spule ist dem Produkt aus dem magnetischen Momente der Spule und dem des Weicheisenstückchens proportional. Das magnetische Moment der Spule ist der Stromstärke proportional, das des Weicheisenstückchens dagegen nicht, sondern nach einem komplizierten Gesetze von ihr abhängig. Die Folge ist, daß die Skale der auf diesem Prinzip beruhenden Apparate, der „Weicheisen“- oder auch „elektromagnetischen Apparate“, durch eine empirische Eichung gewonnen werden muß. Ferner wirkt Wechselstrom wegen der Verluste durch Hysterese und Wirbelströme im Eisen anders als Gleichstrom und auch bei verschiedenen Periodenzahlen verschieden. Die Instrumente müssen also für Wechselstrom eine besondere, nur für eine bestimmte Periodenzahl gültige Skale erhalten. Endlich geben sie für Gleichstrom überhaupt keine scharf definierten Werte, denn der Magnetismus des Eisenstückchens ist infolge der Hystere größer, wenn ein bestimmter Strom durch Verringern eines stärkeren, als wenn er durch Verstärken eines schwächeren eingestellt wird.

Der einzige Vorzug dieser Apparate ist ihre Billigkeit. Sie werden deshalb nur angewandt, wo eine rohe Kenntnis des zu messenden Stromes genügt.

γ) Wirkung zwischen Strom und Strom. Viel wichtiger ist die Strommessung aus der Wirkung zwischen Strom und Strom oder die Wirkung des erst einen festen, dann einen beweglichen Leiter durchfließenden

Digitized by Google

Stromes auf sich selbst. Es leuchtet ein, daß diese Wirkung, solange magnetische Materialien ferngehalten werden, nur von der räumlichen Lage der Ströme zueinander abhängig ist und infolgedessen sehr konstant gemacht werden kann. In der Tat beruhen die besten der gleichzeitig Gleich- und Wechselstrom messenden Apparate auf diesem Prinzipe. Man kann mit ihnen auch Wechselstrom messen, weil die dem Produkte der beiden Ströme i_1 und i_2 proportionale Wirkung ihre Richtung ändert, wenn i_1 oder i_2 sein Vorzeichen ändert. Aendern also beide zugleich ihr Vorzeichen, wie es bei Wechselstrom (i_1 und i_2 zwei Stücke desselben Stromes) der Fall ist, so ändert die Wirkung ihre Richtung nicht.

Dynamometrische Strommesser. Auf diesem Prinzip beruhen zwei Gruppen von Apparaten. Bei denen der ersten Gruppe wird die ablenkende Kraft der Ströme durch eine Feder aufgewogen und der Ausschlag durch einen Zeiger angegeben. Man nennt diese Apparate dynamometrische Strommesser. Das bewegliche System ruht bei ihnen ebenso wie bei den Drehspulapparaten unten mit Stahlspitze auf einem Achatlager. Die Wirkung der Spulen aufeinander durch Eisen zu verstärken, ist aus den bei den Weicheisenapparaten auseinandergesetzten Gründen zu widerraten.

Wenn die dynamometrischen Strommesser zur Messung von Gleichstrom benutzt werden sollen, so ist zu berücksichtigen, daß sie vom magnetischen Erdfelde merklich beeinflußt werden, weil ihr eigenes, von der festen eisenlosen Spule erzeugtes Magnetfeld verhältnismäßig schwach ist. Sie zeigen deshalb für verschiedene Stromrichtungen im allgemeinen verschieden. Man erhält die richtigen Werte, wenn man zwei Ablesungen mit entgegengesetzten Stromrichtungen macht und aus beiden das Mittel nimmt. In dieser Weise findet auch die Eichung der Dynamometer mit Gleichstrom statt, weil sie genauer und bequemer ist als eine Eichung mit Wechselstrom, und die mit Gleichstrom erhaltenen Werte auch für Wechselstrom niederer Frequenz richtig sind. Bei höheren Frequenzen sind besonders dann Abweichungen zu befürchten, wenn das Verzweigungsprinzip angewandt ist, weil der Nebenschlußwiderstand einen anderen Selbstinduktionskoeffizienten besitzt als das Instrument und infolgedessen die Stromverteilung zwischen beiden bei Wechselstrom anders wird als bei Gleichstrom.

Die nebenstehende Figur 8 zeigt einen dynamometrischen Strommesser der Firma Siemens und Halske.

Stromwagen. Die zweite Gruppe der auf der Wirkung zwischen Strom und Strom beruhenden Apparate sind die Stromwagen. Bei ihnen wird die Kraft zwischen den Strömen nicht zur Erzeugung eines Ausschlages verwandt, sondern wie bei einer Wage durch Gewichte ausgeglichen, indem man die eine Spule an dem einen Arm eines Wagebalkens anbringt und den anderen Arm mit Gewichten belastet. Rayleigh, Helmholtz, Lord Kelvin haben derartige Stromwagen konstruiert.

Bei der Stromwage nach Lord Kelvin

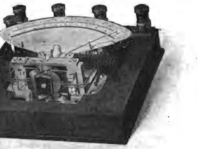


Fig. 8. Dynamometrischer Strommesser.

tragen beide Arme der Wage Spulen, die vom Strome in entgegengesetzten Richtungen durchflossen werden, um die Einwirkung des Erdmagnetismus zu beseitigen. Die Stromrichtung in den vier festen Spulen ist derart, daß die beiden beweglichen Spulen im gleichen Drehsinne angezogen werden. Das entstehende, dem Quadrat des Stromes proportionale Drehmoment wird durch Verschiebung eines Laufgewichtes auf einer Skale balanziert und gemessen. Die Teilung ist direkt in Werten der Stromstärke ausgeführt. Die Stromwagen eignen sich besonders zur Messung großer Ströme und sind hauptsächlich in England beliebt.

δ) Wärmewirkungen des Stromes im durchströmten Leiter. Die Wärmewirkung des Stromes wird in mannigfacher Weise zur Messung ausgenutzt. Da die Wärmewirkung des Stromes seinem Quadrate proportional ist, so mißt man auch nach diesem Prinzip bei Wechselstrom Ef-

Digitized by Google

fektivwerte. Der große Vorzug dieser Verfahren liegt darin, daß sie von fremden Strömen und Magnetfeldern nicht beeinflußt werden und daß sie fast ganz induktions- und kapazitätsfreie Konstruktionen zulassen, weil Spulen nicht vorkommen.

1. Verlängerung des erwärmten Leiters. Hitzdrahtstrommesser. Das technisch wichtigste Verfahren ist die Messung der durch die Stromwärme bewirkten Verlängerung eines Drahtes, des sogenannten Hitzdrahtes.

Bei den neuen von der Firma Hartmann & Braun hergestellten Hitzdrahtinstrumenten durchfließt und erhitzt der Strom einen dünnen, aus Platiniridium hergestellten Draht. Die durch die Erhitzung bewirkte Verlängerung des Drahtes wird in vergrößertem Maße auf einen Zeiger übertragen. Der Uebelstand aller Effektivwerte messenden Strommesser, die Unempfindlichkeit in der Nähe des Nullpunktes ist bei den Hitzdrahtinstrumenten durch einen geschickten Kunstgriff stark verringert. In die Uebertragung der Hitzdrahtverlängerung auf die Zeigerbewegung ist nämlich ein Exzenter eingeschaltet, das bewirkt, daß die Hitzdrahtverlängerung bei kleinem Ausschlag stark, bei großem Ausschlag dagegen nur schwach vergrößert wird. Solange der Strom die Hitzdrahtapparate unverzweigt durchfließt, bleiben ihre Angaben auch für ziemlich hohe Frequenzen richtig. Ja sie lassen sich sogar zur Messung von Strömen der höchsten Frequenzen einrichten, wenn statt eines dickeren Hitzdrahtes zahlreiche sehr dünne einander parallel geschaltet werden.

Die Empfindlichkeit der Hitzdrahtapparate würde sich durch den Einschluß des Hitzdrahtes in ein hohes Vakuum bedeutend steigern lassen. Die Schwierigkeit liegt in der Erhaltung des Vakuums.

2. Temperaturerhöhung des erwärmten Leiters. Statt der Verlängerung eines Hitzdrahtes kann man auch seine dem Quadrate der Stromstärke annähernd proportionale Temperaturerhöhung mit Hilfe eines auf den Draht gelöteten Thermoelementes messen, das an ein Galvanometer angeschlossen wird und in diesem einen der Thermokraft proportionalen Ausschlag erzeugt.

Die Lötstelle muß möglichst punktförmig sein, damit der zu messende Strom nicht in den Thermomeßkreis übergeht. Auch hier wird die Empfindlichkeit wesentlich erhöht, wenn man den Hitzdraht mit dem Thermoelemente, das „Thermokreuz", in ein hochevakuiertes Gefäß einschließt. Eine weitere Erhöhung der Empfindlichkeit ergibt sich durch Reihenschaltung mehrerer solcher Thermokreuze, wobei durch eine von Salomonson angegebene Brückenschaltung nach Figur 9 wiederum dafür gesorgt wird, daß kein Strom in den Thermomeßkreis gelangt. Mit drei Thermokreuzen in jedem Brückenzweige, die aus 15 μ dicken und 12 mm langen Drähten im Vakuum bestehen, erhält man nach Schering bei einem Meßstrome von 5 Milliampere eine Thermo-

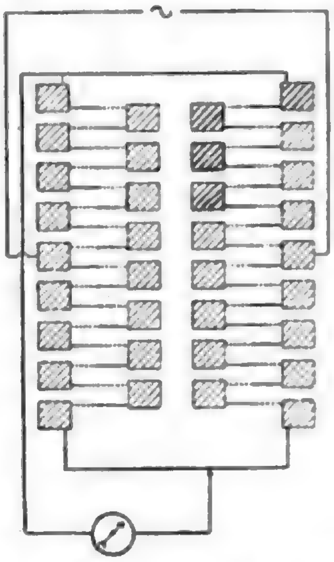


Fig. 9. Salomonson'sche Schaltung.

kraft von 16 Millivolt, die in einem geeigneten Zeigergalvanometer einen Ausschlag über die ganze Skale erzeugt. Der Widerstand der Anordnung beträgt 100 Ohm.

Die Schaltung ist nur brauchbar, wenn Materialien ohne Temperaturkoeffizienten wie Konstanten oder Manganin verwendet werden. Bei anderen Metallen ergeben sich infolge des Peltiereffektes beträchtliche Unterschiede in den Angaben für Gleich- und Wechselstrom.

Die Firma Guggenheimer stellt nach diesem Verfahren, doch ohne die Thermokreuze in ein Vakuum einzuschließen, technische Strommesser her, die direkt Stromstärken bis 1 Ampere bei einem maximalen Spannungsabfall von 0,225 Volt messen.

Bei dem Thermogalvanometer von Duddell sind der vom Meßstrom durchflossene Kreis und der Thermokreis vollständig voneinander getrennt. Der vom Meßstrom durchflossene Hitzdraht besteht aus einem 3 bis 4mm langen platinierten Quarzfaden, der seine Wärme auf ein Thermoelement aus Antimon-Wismut strahlen läßt. Das Thermoelement ist mit Silberdraht zu einer kleinen Schleife geschlossen, die zwischen starken Magnetpolen an einem Quarzfaden aufgehängt ist und einen Ablesespiegel über sich trägt. Widerstand und Empfindlichkeit betragen 4 Ohm und 10^{-4} Volt oder 1000 Ohm und 10^{-6} Ampere für einen Skalenteil Ausschlag bei normalem Spiegelableseverfahren.

3. Widerstandserhöhung des er-

Digitized by Google

wärmten Leiters. Ferner dient die durch die Erwärmung des Hitzdrahtes bewirkte Widerstandserhöhung besonders zur Messung schwacher Hochfrequenzströme. Figur 10

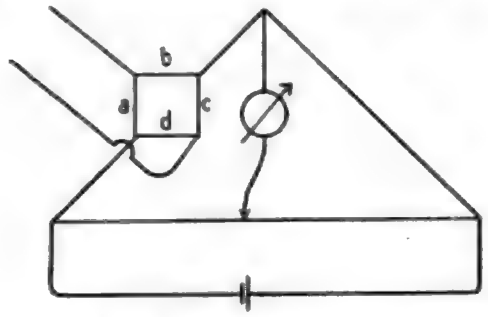


Fig. 10. Bolometerbrücke.

zeigt die Anordnung, die aus einer doppelten Verzweigung, einer sogenannten Bolometerbrücke, besteht. Die Widerstände der durch einen konstanten Akkumulator gespeisten großen Wheatstoneschen Brücke sind so abgeglichen, daß das Galvanometer stromlos ist. Der Meßstrom wird durch die kleine Verzweigung a, b, c, d geleitet, die so abgeglichen ist, daß kein Strom in die große Brücke übergeht (am einfachsten durch a = b = c = d). Die Stromwärme erhöht den Widerstand der kleinen Verzweigung und das Galvanometer zeigt einen der Leistung des zu messenden Stromes proportionalen Ausschlag. Damit äußere Temperaturänderungen nicht stören, wird der rechte Zweig der großen Brücke dem linken vollständig gleich gemacht und beide in derselben wärmeisolierten Kasten eingeschlossen. Nimmt man als Widerstände a b c d Wollastondrähte im hohen Vakuum, so erreicht man sehr große Empfindlichkeiten.

4. Lichtstrahlung des erhitzten Leiters. Starke Ströme lassen sich auch durch die Glühtemperatur messen, in die sie einen geeigneten Leiter, z. B. ein dünnes Platinband, in definierter Umgebung versetzen. Die Glühtemperatur läßt sich photometrisch genau bestimmen. Die Eichung wird mit Gleichstrom bekannter Intensität vorgenommen. Ein Nachteil der Methode liegt darin, daß elektrisch geglühte Metalle zerstäuben und infolgedessen ihr Widerstand langsam wächst, so daß eine öftere Wiederholung der Eichung nötig ist.

ε) Striktionswirkung des Stromes. Wenn ein Strom einen Leiter durchfließt, so entsteht infolge der Anziehung zwischen den einzelnen Stromfäden im Leiter ein nach seiner Achse gerichteter Druck, dessen Größe dem Quadrat der Stromstärke proportional ist. Ist der Leiter eine Flüssigkeit, so läßt sich die Größe des Druckes messen. Dieses Prinzip hat der Amerikaner Northrup zur Konstruktion eines Strommessers für hohe Stromstärken benutzt. Die Figur 11 läßt die Anordnung eines Striktionselementes erkennen. Der Strom fließt von dem Kupferzylinder A_1 durch die von dem Elfenbeinring e begrenzte Quecksilberschicht z nach A_2. Dann steigt das Quecksilber infolge des nach der Achse gerichteten Striktionsdruckes in p_2 an und sinkt in p_1. Unter Annahme gleicher Stromverteilung läßt sich die Druckwirkung und die Steighöhe berechnen. Für ein einzelnes Element ist sie gering, aber sie läßt sich leicht durch Hintereinanderschaltung mehrerer Elemente und

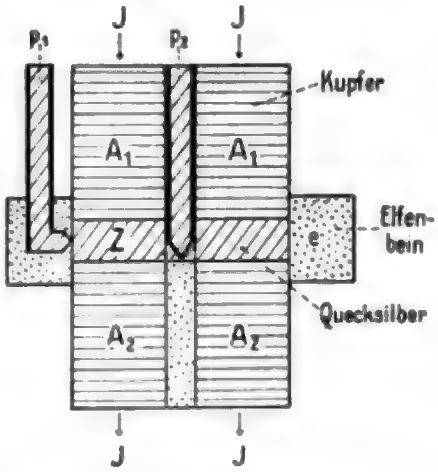


Fig. 11. Schema eines Striktionselementes nach Northrup.

durch Ueberschichtung des Quecksilbers mit dem spezifischen viel leichteren Wasser stark vergrößern. So konstruierte Northrup einen Strommesser für 2000 Ampere mit einer Steighöhe von 50 cm und dem äußerst geringen Energieverbrauch von 23 Watt.

Die Instrumente können mit Gleichstrom geeicht werden und sind von der Kurvenform des Wechselstromes sowie von äußeren Feldern unabhängig.

4d) Meßverfahren, mit denen nur der Effektivwert von Wechselströmen gemessen werden kann. *α*) Das Induktionsprinzip. Von den Verfahren, mit denen ausschließlich Wechselstrom oder die Wechselstromkomponente eines periodischen Stromes gemessen wird, kann nur das Induktionsprinzip zur Konstruktion von Zeigerapparaten benutzt werden. Die anderen Verfahren eignen sich nur zu Nullmethoden. Der Induktionsstrommesser entspricht einem Zweiphasenmotor. Ein umlaufendes Magnetfeld erzeugt in einem Anker Wechselströme, die von den Wechselströmen der festen Spulen angezogen werden und auf den Anker ein Drehmoment ausüben, das mit Hilfe einer Feder zu einer von der Stromstärke abhängigen Einstellung führt. Figur 12 zeigt das Schaltungsschema eines

Digitized by Google

Induktionsstrommessers, Figur 13 die Anordnung seiner Spulen. Der in das Instrument eintretende Strom verzweigt sich bei 1 in zwei Zweige, von denen der eine eine große Selbstinduktion bei kleinem Widerstande, der andere eine geringe Selbstinduktion mit Vorschaltwiderstand enthält. Die Folge ist, daß die Ströme in den beiden Zweigen in der Phase gegeneinander verschoben sind. Durchfließen sie die festen Spulen des In-

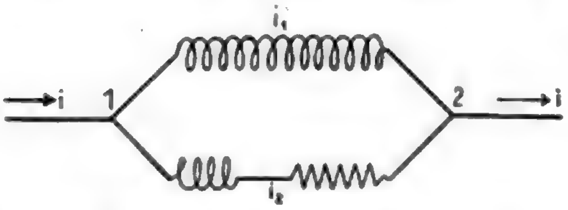


Fig. 12. Stromverzweigung in einem Induktionsstrommesser.

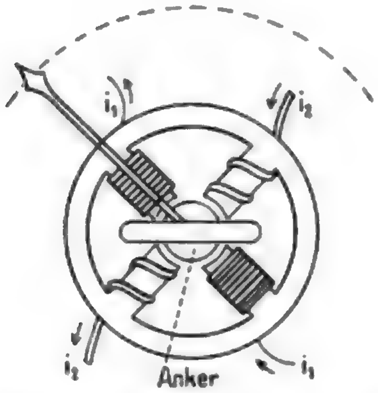


Fig. 13. Schema eines Strommessers nach dem Induktionsprinzip.

strumentes in der in Figur 13 angegebenen Weise, so entsteht in dem aus einem Aluminiumzylinder bestehenden Anker ein magnetisches Drehfeld, das die oben angegebenen Wirkungen ausübt. Die genauere Theorie der Instrumente ist verwickelt. Ihr Hauptmangel ist, daß sie auf einen ziemlich engen Bereich der Frequenz beschränkt sind.

β) Das Resonanzprinzip. Erteilt man einem schwingungsfähigen Systeme regelmäßige Stöße von einer Frequenz, die mit der Eigenfrequenz des Systemes nahe oder völlig zusammenfällt, so kann man das System durch sehr geringfügige Stöße zu starken Schwingungen anregen. Nach diesem Prinzip lassen sich verschiedene sehr empfindliche Nullinstrumente konstruieren. Denn mit Hilfe der Intensität der Schwingungen die Stärke des erregenden Stromes zu messen, ist unmöglich, weil sich die Empfindlichkeit der Systeme mit der Genauigkeit, mit der die Resonanz erreicht ist, sehr stark ändert und es praktisch unmöglich ist, die Frequenz des zu messenden Stromes und auch die Eigenfrequenz des Systemes während des Versuches so konstant zu erhalten, wie es für diesen Zweck nötig wäre. Infolgedessen kann man nur auf Verschwinden der Schwingungen, also Verschwinden des Stromes einstellen. Da die Schwingungen aber auch fast ganz aufhören, wenn die Resonanz verloren geht, so ist auf deren Erhaltung besonderer Wert zu legen. Ströme, deren Frequenz inkonstant ist, lassen sich nach diesem Prinzip nicht messen.

Es eignen sich für das Resonanzprinzip die Wirkung zwischen Strom und Magneten und die Wirkung zwischen Strom und weichem Eisen. Die Wärmewirkung und die Striktionswirkung des Stromes sind zu träge, die Wirkung zwischen Strom und Strom für Nullmethoden zu unempfindlich.

Dem Nadelgalvanometer ähnlich ist das Vibrationsgalvanometer nach Dubois-Rubens. Es benutzt die Torsionsschwingungen einer gespannten Saite, deren Eigenfrequenz sich durch Aenderung ihrer Länge, Dicke und Spannung in weiten Grenzen variieren läßt. In der Nähe von vier über Kreuz stehenden kleinen, mit Spulen versehenen Magnetpolen trägt die Saite Eisenstäbchen. Der Wechselstrom wird so durch die Spulen geführt, daß die von dem Magnetpolen magnetisierten Eisenstäbchen zum Schwingen gebracht werden. Ueber den Eisenstäbchen trägt die Saite einen winzigen Spiegel, in dem das Bild einer Lichtlinie (beleuchteter Spalt, Faden einer Glühlampe usw.) mit einem Fernrohre beobachtet wird. Schwingt die Saite, so wird das Bild der hellen Linie zu einem Bande verbreitert.

Eine andere, dem Drehspulgalvanometer nachgebildete Form ist das Vibrationsgalvanometer von Duddell. Das bewegliche vom Strom durchflossene System wird durch eine bifilare Schleife aus flachem Kupfer- oder Bronzeband gebildet, auf die ein kleiner Spiegel aufgekittet ist. Die Schleife liegt zwischen den zugeschärften Polen eines starken Elektromagneten. Die Eigenfrequenz läßt sich auch hier durch Aenderung der Länge, Dicke und Spannung der Bänder in weiten Grenzen verändern.

Beide Arten von Vibrationsgalvanometern besitzen eine große Empfindlichkeit. Das von Dudell hat den Vorzug geringer Selbstinduktion.

γ) Das Telephonprinzip. Endlich gehören noch die Telephone zu den Instrumenten, die ausschließlich durch Wechselstrom beeinflußt werden. Ihre Anordnung ist bekannt. Eine Eisenmembran ist vor den Polen eines hufeisenförmigen Magneten eingespannt. Die Schenkel des Magneten tragen die von Meßstrom durchflossenen Spulen, die die Membran in Schwingungen versetzen. Der Unterschied der Telephone gegen die Resonanzinstrumente

Digitized by Google

liegt darin, daß die Schwingungen der Telephonmembran erzwungene Schwingungen sind, die im allgemeinen von den Eigenschwingungen der Membran weit entfernt sind. Deshalb fällt beim Telephon die mühsame Abstimmung auf Resonanz fort. Nach der Art der Benutzung unterscheidet man die bekannten Hörtelephone, bei denen auf das Verschwinden des Meßstromes aus dem Aufhören des Tönens geschlossen wird, und das optische Telephon. Da das Telephon durch alle möglichen Schwingungen zum Tönen gebracht wird und das menschliche Ohr für die höheren Töne besonders empfindlich ist, so wirken bei einem nicht sinusförmigen Wechselstrom vor allem die Oberschwingungen und man erhält bei der Messung von Erscheinungen, die von der Frequenz des Wechselstromes abhängen, mit dem Hörtelephon keine sauberen Ergebnisse. Bei dem optischen Telephon werden die Schwingungen der Membran durch einen Stift auf einen Spiegel übertragen, der an einer Feder befestigt ist. Die Beobachtung erfolgt in derselben Weise wie bei den Vibrationsgalvanometern.

4e) Messung und Analyse der Kurvenform von Wechselströmen. Zur vollständigen Charakterisierung eines Wechselstromes gehört die Kenntnis seiner Intensität, Kurvenform, Frequenz und Phase.

Im vorstehenden ist die Messung der Intensität behandelt. Im folgenden soll eine kurze Uebersicht über die Messung der Kurvenform von Wechselströmen gegeben werden.

Die allgemeinste Stromform ist der periodische Strom. Er erfüllt lediglich die Bedingung, daß er in allen um die gleiche Zeit τ, die Periode, auseinander liegenden Augenblicken gleiche Intensität und Richtung besitzt. Jeder periodische Strom läßt sich in einen konstanten Gleichstrom und einen übergelagerten „reinen" Wechselstrom zerlegen. Der letztere ist dadurch gekennzeichnet, daß er keine Gleichstromwirkungen ausübt (Drehspulapparate, Elektrolyse).

Nach Fourier kann nun jeder beliebige periodische Strom aus einer Reihe sinusförmiger Schwingungen summiert gedacht werden, deren Perioden sich wie 1:2:3 bis Unendlich verhalten und in der Phase beliebig zueinander liegen können (vgl. den Artikel „Fouriersches Theorem").

Der mathematische Ausdruck dafür ist

$$i = \sum_{k=0}^{k=\infty} J_k \sin(k\omega t + \gamma_k)$$

worin $\omega = 2\pi n$, n die Frequenz, i ein Momentanwert des Stromes, $J_1, J_2 \ldots J_\infty$ die Maximalwerte (Amplituden) der zu den Periodenzahlen nt, 2nt...∞nt gehörenden Teilwellen, $\gamma_1, \gamma_2 \ldots \gamma_\infty$ die Phasenverschiebung der Teilwellen bedeutet.

Entwickelt man die Winkelfunktionen und setzt

$$\mathfrak{A}_k = J_k \cos \gamma_k$$
$$\mathfrak{B}_k = J_k \sin \gamma_k$$

so erhält man

$$i = \sum_{k=0}^{k=\infty} \mathfrak{A}_k \sin k\omega t + \mathfrak{B}_0 + \sum_{k=0}^{k=\infty} \mathfrak{B}_k \cos k\omega t.$$

$\mathfrak{B}_0$ ist die Gleichstromkomponente des periodischen Stromes.

In der Technik liegen meistens reine Wechselströme vor, bei denen die negative und positive Hälfte einander spiegelbildlich gleich sind. Dann ist

1. $\mathfrak{B}_0 = 0$
2. k stets ungerade

Spiegelbildlich symmetrische Wechselströme enthalten nur ungerade Oberschwingungen.

In manchen Fällen genügt es, den allgemeinen Charakter der Kurve zu kennen. Dazu verhelfen der Formfaktor und der Scheitelfaktor.

Unter dem Formfaktor f versteht man das Verhältnis des Effektivwertes der Stromstärke zum arithmetischen Mittelwerte. Als Scheitelfaktor σ wird das Verhältnis des Scheitelwertes (maximalen Augenblickswertes) zum effektiven definiert. Die folgende Tabelle gibt die Werte beider Faktoren für einige besondere Kurvenformen

	f	σ
Sinuskurve	1,111	1,414
Gleichseitig dreieckige Kurve	1,15	1,732
Rechteckige Kurve	1,00	1,00

α) Punktförmige Kurvenaufnahme. Unter den Apparaten, die zur Aufnahme von Wechselstromkurven dienen, unterscheidet man die älteren, bei denen die Kurve Punkt für Punkt aufgenommen wurde, von den neueren, die das vollständige Kurvenbild erscheinen lassen, so daß es direkt photographiert werden kann.

Der Grundgedanke der punktförmigen Kurvenaufnahme rührt von Joubert her. Das Wesentliche ist ein Kontaktmacher, der in jeder Periode nur einmal während einer sehr kurzen Zeit und stets in derselben Phase einen Kontakt herstellt. Mißt man die Stromstöße, die von der im Momente des Kontaktes herrschenden Spannung erzeugt werden, und geht man durch Verstellen des Kontaktmachers allmählich über die ganze Periode, so erhält man ein vollständiges Bild der Kurve.

Die Nachteile der Methode sind, daß der Kontakt stets eine gewisse Dauer hat und nur den Mittelwert der während dieser Dauer herrschenden Spannungen liefert, so daß Feinheiten der Kurve verloren gehen, ferner daß die aufzunehmende Kurve und auch die Intensität des Stromes während der Dauer der Aufnahme, die nicht gering ist, konstant bleiben muß.

Da die Methode durch die neueren Verfahren vollständig überholt ist, kann sie hier nicht weiter behandelt werden.

β) Momentaufnahme der vollständigen Kurve. 1. Mit Hilfe freier

Digitized by Google

Elektronen. Die unmittelbar die ganze Kurve zeichnenden Apparate zerfallen wiederum in zwei Gruppen. Die der einen benutzen Elektronen als schwingende Gebilde. Das hat den außerordentlichen Vorteil, daß die Elektronen bei ihrer verschwindend geringen Masse den schnellsten Aenderungen des Stromes vollkommen zu folgen vermögen und infolgedessen selbst die Hochfrequenzströme der drahtlosen Telegraphie in allen Feinheiten wiedergeben.

Die der anderen Gruppe beruhen auf der Ablenkung eines Lichtstrahles durch einen Spiegel, der von einem durch den Strom beeinflußten beweglichen System getragen wird.

Sie genügen für die gewöhnlichen technischen Frequenzen und sind in mancher Hinsicht einfacher im Gebrauch als die der ersten Gruppe.

Bei allen diesen Apparaten wird ein leuchtender, photographisch wirksamer Fleck gleichzeitig in zwei zueinander senkrechten Richtungen, den Ordinaten und Abszissen der Kurve entsprechend, abgelenkt. Die eine Ablenkung (die Ordinaten) ist den Momentanwerten des aufzunehmenden Stromes, die andere (die Abszissen) der Zeit proportional.

Braunsche Röhre. Der verbreitetste Apparat der ersten Gruppe ist die Braunsche Röhre, die in Figur 14 schematisch wiedergegeben ist. Sie benutzt als schwingendes System die in sehr verdünnten Gasen entstehenden Kathodenstrahlen, die sich sowohl durch ein magnetisches als auch durch ein elektrisches senkrecht zu ihrer Bahn verlaufendes Feld ablenken lassen. In Figur 14

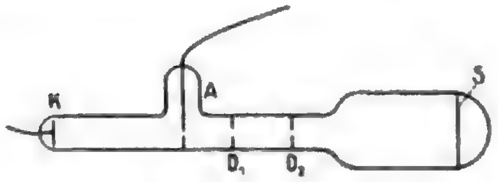


Fig. 14. Braunsche Röhre.

ist A die Anode, K die Kathode der Röhre, die am besten durch eine Influenzmaschine gespeist wird. Die von K ausgehenden Strahlen fallen auf die Diaphragmen D_1 und D_2, die nur ein dünnes zylindrisches Strahlenbündel hindurchlassen. Dieses fällt auf den mit Sidotblende (Zinksulfid) bestrichenen Schirm und erzeugt auf ihm einen hellen Lumineszenzfleck. Rechts von D_2 wird eine Spule an die Röhre gebracht, deren Windungsebene der Röhrenachse parallel liegt. Der sie durchfließende Strom, dessen Kurvenform abgebildet werden soll, erzeugt in ihr ein proportional seiner Intensität schwingendes Magnetfeld, das auf der Richtung der Kathodenstrahlen senkrecht steht, und die Ordinatenbewegung des Lumineszenzfleckes erzeugt. Die Abszissenbewegung kann man dadurch erhalten, daß man den schwingenden Fleck im gleichmäßig rotierenden Spiegel betrachtet. Besser ist es jedoch, sie dadurch zu gewinnen, daß man das Kathodenbündel durch eine zweite Spule beeinflußt, deren Achse zu ihm und der ersten Spule senkrecht steht. Durch diese Spule sendet man einen Strom, der während jeder Periode proportional der Zeit von Null an bis zu einem maximalen Werte zunimmt, um bei Beginn jeder neuen Periode plötzlich wieder auf Null zu sinken. Alsdann erscheint die vollständige Kurve des zu untersuchenden Stromes objektiv auf dem Schirm S. Der proportional der Zeit zunehmende Hilfsstrom wird durch ein Widerstandsband erzeugt, das auf dem Umfange einer synchron mit dem zu untersuchenden Strom rotierenden Scheibe eingelassen ist, und auf dem eine Bürste schleift.

Für die Aufnahme von Spannungskurven ist es zweckmäßiger, nicht die magnetische, sondern die elektrostatische Ablenkbarkeit der Kathodenstrahlen zu benutzen. Man baut in die Röhren zwei einander dicht gegenüberstehende Metallplatten ein. Die zwischen ihnen hindurchfliegenden Elektroden des Kathodenstrahles werden durch die an die Metallplatten gelegte, zu untersuchende Spannung abgelenkt. Bei einer Größe der Metallplatten von 2×8 cm, 0,9 cm Abstand und geeignetem Druck geben 80 Volt 40 mm Ausschlag auf dem Schirme. Höhere Spannungen müssen mit Kondensatoren unterteilt werden. Außerdem hängt die Größe des Ausschlages von der Geschwindigkeit der Kathodenstrahlen ab, die man künstlich vergrößern oder verringern kann.

Glimmlichtoszillograph von Gehrke. Der Glimmlichtoszillograph von Gehrke beruht darauf, daß die Oberfläche des auf der Kathode bei Gasentladungen in hoch evakuierten Röhren entstehenden Glimmlichtes der Stromstärke proportional ist. Wird als Kathode ein Draht genommen, so erscheint das Glimmlicht als leuchtende Linie, deren Länge der Stromstärke entspricht. Da bei Wechselstrom beide Elektroden abwechselnd Kathode werden, so werden beide aus geraden Drähten hergestellt, die, wie Figur 15 zeigt, derart seitlich

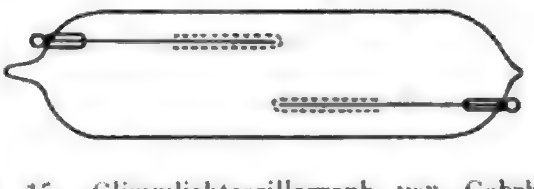


Fig. 15. Glimmlichtoszillograph von Gehrke.

Digitized by Google

versetzt sind, daß sie in bestimmter Richtung betrachtet eine fortlaufende gerade Linie bilden, auf der das Glimmlicht oszilliert. Betrachtet man das Bild der Linie im rotierenden Spiegel, so sieht man das Bild der Kurve. Doch erscheint sie nicht als Linie, sondern die ganzen von der Kurve und der Nullinie umschlossenen Flächen leuchten und geben die Kurve als Begrenzung.

Um die Intensität des Glimmlichtes zu erhöhen, nimmt man statt der Drähte breite Nickelbleche. Betrachtet man sie von der scharfen Kante her, so sieht man in eine beträchtliche Tiefe des Glimmlichtes hinein. Doch wird die größere Intensität auf Kosten der Empfindlichkeit erkauft, da infolge der vergrößerten Kathodenfläche größere Stromstärken nötig sind, um die gleiche Länge des Glimmlichtes zu erzielen, wie bei dünnen Drähten. Den großen Vorzügen dieses Oszillographen, die in seiner Freiheit von Kapazität und Selbstinduktion, sowie seiner großen Empfindlichkeit bestehen, tut der Nachteil Abbruch, daß er erst oberhalb 300 Volt anspricht. Er gibt also Kurven, deren unterhalb 300 Volt liegende Teile in die Nulllinie gesunken sind und ist infolgedessen nur für hohe Spannungen zu gebrauchen.

2. Kurvenaufnahme mit Hilfe beweglicher Massensysteme. Der Erfinder der Oszillographen mit schwingendem, vom Strom beeinflußten Draht- oder Magnetnadelsystem ist Blondel. Man unterscheidet ähnlich wie bei den Galvanometern Nadeloszillographen, Spulen- oder besser Schleifenoszillographen und Saitenoszillographen. Ihr Prinzip ist das gleiche wie das der entsprechenden Galvanometer. Ihr wesentlicher Unterschied gegen diese besteht darin, daß ihre Eigenfrequenz auf mehrere tausend Schwingungen in der Sekunde gebracht und ihre Dämpfung aperiodisch ist, so daß sie auch den höheren Oberschwingungen eines fünfzigperiodigen Wechselstromes noch gut zu folgen vermögen.

Nadeloszillograph von Blondel. Bei den Blondelschen Nadeloszillographen ist ein 0,2 bis 0,3 mm dickes Eisenband zwischen den Polen eines kräftigen Magneten ausgespannt, der es quermagnetisiert, so daß es sich wie ein sehr breiter kurzer Magnet verhält. Der zu untersuchende Strom durchfließt zwei vor und hinter dem Bande aufgestellte Spulen, die es ablenken. Die der Ablenkung entgegenwirkende Richtkraft wird von dem starken konstanten Magnetfelde und von der Torsion des Bandes ausgeübt. Letztere läßt sich durch die Zugspannung des Bandes ändern.

Die richtige Dämpfung wird dadurch erzielt, daß das ganze System in ein geeignetes Oel (Vaselinöl, Rizinusöl oder Mischung beider) eingetaucht wird.

In der Mitte trägt das Eisenband einen winzigen Spiegel, der einen schmalen auf ihn geworfenen, durch eine Zylinderlinse passend gerichteten Lichtstrahl auf eine zweite Zylinderlinse reflektiert. Letztere zieht ihn zu einem leuchtenden Punkt zusammen. Bei der Kleinheit des Oszillographenspiegels muß die Lichtquelle so intensiv sein wie irgend möglich. Durch die Bewegungen des Oszillographenspiegels erhält der leuchtende Fleck die der Stromkurve entsprechenden Ordinatenbewegungen. Die Abzsissenbewegung wird ihm bei Blondel dadurch erteilt, daß er von einem zweiten großen Spiegel reflektiert wird, der durch einen Synchronmotor und ein Exzenter während anderthalb bis zweier Perioden proportional der Zeit in einer Richtung gedreht wird und dann schnell zurückschnappt. Dieser Spiegel wirft den leuchtenden Fleck auf eine Mattscheibe oder eine photographische Platte, auf der die Kurve dann direkt als leuchtende Linie aufgezeichnet wird.

Blondel hat mit seinem Nadeloszillographen Eigenfrequenzen von 50000 erreicht. Ferner haben diese Oszillographen den Vorzug, daß sie eine schlechte Behandlung vertragen. Dafür sind sie aber viel weniger empfindlich als die bifilaren Oszillographen. Bei einer Eigenfrequenz von 6000 und einem Spulenwiderstand von 3 Ohm sind 0,3 Ampere erforderlich, um brauchbare Kurven zu erhalten. Außerdem werden die Kurven, besonders die Stromkurven, die durch Abzweigung von einem Nebenschlußwiderstand aufgenommen werden, durch die Selbstinduktion der ablenkenden Spulen leicht verzerrt.

Bifilare Oszillographen. Die von Duddell ausgebildeten bifilaren oder Schleifenoszillographen sind dem Duddellschen Vibrationsgalvanometer sehr ähnlich. Sie sind Vibrationsgalvanometer hoher Eigenfrequenz, die nicht Resonanzschwingungen, sondern bei geringerer Empfindlichkeit erzwungene, der Kurvenform des zu messenden Stromes proportionale Schwingungen ausführen.

Der Strom durchfließt zwei schmale und sehr dünne unmittelbar nebeneinander zwischen den Polen eines kräftigen Elektromagneten ausgespannte Bänder aus Phosphorbronze mit aufgeklebtem winzigem Spiegel. Die Dämpfung und die Sichtbarmachung der Schwingungen erfolgt in denselben Weise wie bei den Nadeloszillographen.

Die bifilaren Oszillographen haben den Vorteil, daß sie praktisch induktionslos sind und eine größere Empfindlichkeit besitzen als die Nadeloszillographen. Dafür reißen die Bänder andererseits sehr leicht bei

Digitized by Google

Ueberlastungen. Mit Aluminiumbändern von 10 bis 15 cm Länge erzielte Blondel Eigenfrequenzen von 10000 bis 15000 und eine Empfindlichkeit von 4 cm Ausschlag bei 0,05 bis 0,1 Ampere und 0,5 m Skalenabstand.

Durch die Firma Siemens & Halske sind die bifilaren Oszillographen glänzend durchkonstruiert. Die Figur 16 zeigt die von dieser Firma gebauten Oszillographen mit abgenommenem Gehäuse. Bei ihnen wird so scheint er bei ihrer Drehung nach Figur 17 für ein senkrechtblickendes Auge von links nach rechts zu wandern.

Die Eigenfrequenz der Siemensschen Oszillographen ist normal 6000. 0,1 Ampere geben bei 0,5 m Skalenabstand 4 bis 5 cm Ausschlag. Bei der Frequenz 4000 ist die zehnfache Empfindlichkeit vorhanden.

Saitenoszillograph. Der Saitenoszillograph von Edelmann schließt sich an das Saitengalvanometer von Einthoven an.

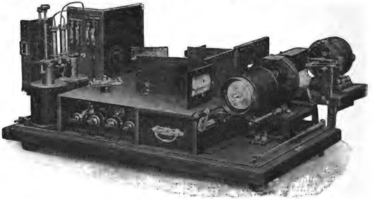


Fig. 16. Oszillograph von Siemens und Halske.

die Abszissenbewegung durch Exzenter nur angewandt, wenn die Kurven stark vergrößert projiziert werden sollen. Zum Photographieren gibt man dem lichtempfindlichen Papier die Abszissenbewegung einfach dadurch, daß man es auf eine synchron rotierende zylindrische Trommel aufspannt, die vom leuchtenden Fleck getroffen wird.

Sollen die Kurven subjektiv betrachtet werden, so läßt man den hellen Fleck auf eine Fläche fallen, deren Leitlinie einen Teil einer archimedischen Spirale bildet. Bei dieser ist die Länge des Radiusvektors dem Drehungswinkel proportional. Fällt also ein Lichtstrahl horizontal auf die Fläche,

Fig. 17. Archimedische Spirale zur Sichtbarmachung von Oszillographenschwingungen.

Die Schenkel zweier übereinander stehender permanenter Magnete umschließen einen Messingklotz M (Fig. 18), der in einem vertikalen doppelkeilförmigen Spalte zwei drei-

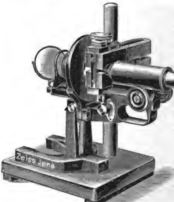


Fig. 18. Saitenoszillograph von Edelmann.

kantige Polschuhe trägt. Zwischen ihnen ist ein versilberter Quarzfaden isoliert ausgespannt. Der zu untersuchende Strom versetzt den Faden in Schwingungen parallel zur Richtung der Gabelzinken. Mit Hilfe des Mikroskopes P kann die Ordinatenbewegung des von einem Lichtstrahl punktförmig beleuchteten Fadens betrachtet werden. Zur Herstellung der Kurve wird das Bild des Fadens auf eine mit photographischem Papier überzogene Trommel geworfen. Die Empfindlichkeit ist sehr groß. Ein versilberter Quarzfaden von 0,003 mm Dicke gibt bei 8.10^{-10} Ampere einen Millimeter Ausschlag, eine Empfindlichkeit, die von keinem anderen Oszillographen auch nur annähernd erreicht wird.

γ) Messung des Formfaktors. Der Formfaktor einer Kurve läßt sich messen, wenn man einen Kontaktmacher so einrichtet, daß er genau während einer halben Periode Kontakt macht. Man schaltet ihn in Serie mit einem Drehspulstrommesser, der dann die halbe mittlere Stromstärke angibt. Gleichzeitig mißt man die effektive Stromstärke und erhält als den Quotienten beider den Formfaktor.

δ) Analyse von Wechselstromkurven. Zur Analyse gegebener Kurven, das heißt, zur zahlenmäßigen Feststellung der sie zusammensetzenden Sinusschwingungen gibt es zwei Wege, den experimentellen, auf dem man diese Größen direkt mißt und den analytischen, auf dem man sie aus den gezeichneten Kurven graphisch und rechnerisch ermittelt.

Die eleganteste experimentelle Methode ist die Messung der Schwingungen durch Resonanz. Wenn an eine sinusförmige Spannung der Frequenz n eine Selbstinduktion L und eine Kapazität C in Serie angeschlossen werden, so wird für ganz bestimmte zueinandergehörige Werte von n, C und L die Wirksamkeit der Selbstinduktion durch die der Kapazität aufgehoben und der Stromkreis verhält sich, als ob nur sein Ohmscher Widerstand R vorhanden wäre, so daß der Strom ein Maximum erreicht. Die Bedingung hierfür ist, wenn $2\pi n = \omega$ gesetzt wird,

$$L\omega^2 = \frac{1}{C\omega}$$

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC}}$$

Mit Hilfe dieser Beziehung kann man durch Verändern von L und C sämtliche Resonanzen und damit sämtliche Oberschwingungen der Kurve finden und aus der Größe jedes Strommaximums ihre Intensitäten bestimmen.

Die graphische Analyse beruht in ihrer einfachsten Form auf der Ausmessung einer großen Anzahl von Ordinaten der zu untersuchenden Kurve und der Berechnung der verschiedenen Glieder der Fourierschen Reihe aus den gemessenen Werten. Durch Konstruktion besonderer Apparate, der Analysatoren, die die Zerlegung der Kurve in ihre Einzelschwingungen auf mechanischem Wege ausführen, ist die Methode sehr verbessert worden.

Literatur. **Heinke**, *Handbuch der Elektrotechnik. Leipzig 1908.* — **Abraham**, *Theorie der Elektrizität. Leipzig 1905.* — **Kittler**, *Allgemeine Elektrotechnik 1909 und 1910.* — **Kohlrausch**, *Lehrbuch der Physik. Leipzig und Berlin 1910.* — **Maxwell**, *Lehrbuch der Elektrizität und des Magnetismus. Berlin 1883.* — **Orlich**, *Aufnahme und Analyse von Wechselstromkurven. Braunschweig 1906.*

G. Schulze

Elektrische Ventile.

1. Definition und Anwendung elektrischer Ventile. 2. Die Schaltungen der Ventile und die allgemeinen Eigentümlichkeiten der Gleichrichtung von Wechselstrom. 3. Die Einteilung der Ventile nach den bei ihnen benutzten Grenzen: a) Die Grenze Metall — Metall. Ventilwirkung durch Thermokräfte. b) Die Grenze Metall — Gas: α) Ventilwirkung durch anormalen Kathodenfall. β) Ventilwirkung durch normalen Kathodenfall. c) Die Grenze Metall — Elektrolyt. d) Die Grenze Gas — Elektrolyt. Elektrolytgleichrichter. 4. Ventile, deren Wirkungsweise noch nicht sicher erklärt ist. Detektoren.

1. Definition und Anwendung elektrischer Ventile. Ein elektrisches Ventil ist eine Vorrichtung, die dem elektrischen Strome in der einen Richtung einen anderen Widerstand (und zwar im allgemeinen einen Widerstand von anderer Größenordnung) bietet als in der entgegengesetzten Richtung, so daß das Ventil bei gleichen Spannungen in der einen Richtung einen viel stärkeren Strom zuläßt als in der anderen. Ferner soll diese Eigenschaft, die auch Unipolarität genannt wird, in der physikalischen Beschaffenheit des Ventiles ihre Ursache haben und nicht durch äußere Bewegungen hervorgerufen werden: Schalter, schwingende Kontaktfedern und rotierende Kollektoren gehören nicht zu den Ventilen.

Die elektrischen Ventile finden eine zweifache Verwendung, die man als statische und dynamische kennzeichnen kann. Statisch werden sie verwendet, um die normale gewünschte Richtung eines Gleichstromes zuzulassen, die entgegengesetzte zu unterdrücken. Lädt beispielsweise eine auf der Achse einer fahrenden Lokomotive sitzende Dynamo

Digitized by Google

eine Akkumulatorenbatterie für die Zugbeleuchtung, so verhindert ein eingeschaltetes Ventil, daß sich die Akkumulatorenbatterie rückwärts durch die Dynamo kurzschlußartig entlädt, während der Zug hält.

Dynamisch dagegen benutzt man die Ventile, um Wechselstrom in Gleichstrom zu verwandeln. Dieses Anwendungsgebiet hat in den letzten Jahren sowohl bei der Gleichrichtung starker Ströme niederer Frequenz, als auch bei der Umwandlung äußerst geringer Hochfrequenzströme in Gleichstrom eine große Wichtigkeit erlangt.

2. Die Schaltungen der Ventile und die allgemeinen Eigentümlichkeiten der Gleichrichtung. Im Interesse der Darstellung empfiehlt es sich, zunächst die Ventile als gegeben anzusehen und die bei ihrer Verwendung üblichen Schaltungen sowie die gemeinsamen Eigentümlichkeiten ihrer Wirkungsweise vorweg zu behandeln. Dabei sollen die Ventile der Einfachheit halber als ideal angenommen werden, d. h. in der durchlässigen Richtung oder „Flußrichtung" den Widerstand Null, in der undurchlässigen Richtung oder „Sperrichtung" den Widerstand unendlich haben.

Bei statischer Verwendung eines Ventils versteht sich die Schaltung von selbst. Das Ventil wird einfach in den Stromkreis eingeschaltet, in dem nur eine Stromrichtung möglich sein soll.

Bei dynamischer Verwendung oder Gleichrichtung von Wechselströmen hat diese einfachste Schaltung den Nachteil, daß die eine Richtung des Wechselstromes einfach unterdrückt wird, die einzelnen gleichgerichteten Stromstöße also durch Pausen unterbrochen sind, die ebenso lang sind wie sie selbst. Deshalb wird diese Schaltung nur bei gelegentlicher Verwendung selbstgefertigter Ventile im Laboratorium benutzt, soweit es sich um Ströme niederer Frequenz handelt. Dagegen ist sie die Regel bei der Gleichrichtung der Hochfrequenzströme der Funkentelegraphie zu Meßzwecken. Die Ursachen hierfür liegen teils in dem eigentümlichen Verhalten, teils in der Inkonstanz der bei der Funkentelegraphie benutzten Ventile, die kompliziertere Schaltungen nicht zuläßt.

Zur Ausnutzung beider Richtungen des Wechselstromes müssen mehrere Ventile kombiniert werden. Bei der sogenannten Graetzschen Schaltung werden zum Gleichrichten von einphasigem Wechselstrome vier Ventile in der in Figur 1 angegebenen Weise miteinander verbunden. Die Ventile sind als Pfeile gezeichnet, deren Richtung die Flußrichtung angeben soll. Man überzeugt sich leicht, daß in dem Gleichstromkreise der Strom stets in der eingezeichneten Richtung fließt. Zum Gleichrichten von Drehstrom sind in der Graetzschen Schaltung 6 Ventile erforderlich, die nach dem Schema der Figur 2 miteinander verbunden werden.

Viel mehr als die Graetzsche Schaltung wird die Transformatorschaltung benutzt, die in Figur 3 für Einphasenstrom

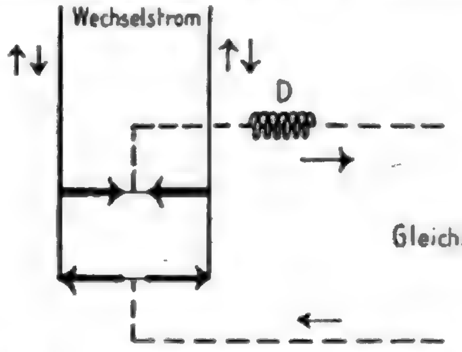


Fig. 1. Grätzsche Schaltung für einphasigen Wechselstrom.

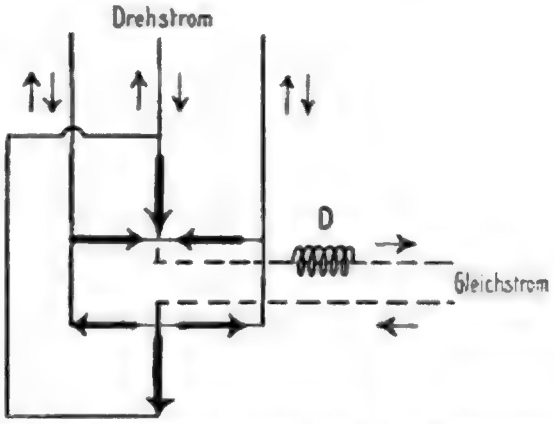


Fig. 2. Grätzsche Schaltung für Drehstrom.

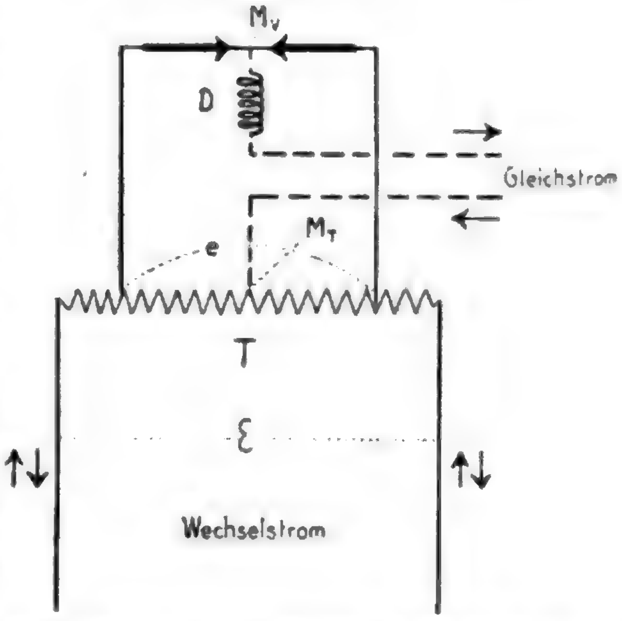


Fig. 3. Transformatorschaltung für einphasigen Wechselstrom.

und in Figur 4 für Drehstrom wiedergegeben ist. T ist ein sogenannter Spar- oder Autotransformator, an dessen Enden die Betriebs-

Digitized by Google

wechselspannung E liegt. Die im Verhältnis der Windungszahlen verkleinerte (oder vergrößerte) Spannung e wird zwei oder bei Drehstrom drei Ventilen zugeführt. Der den gleichgerichteten Strom führende Kreis liegt zwischen dem Mittelpunkte M_V der Ventile und dem Mittelpunkte M_T des Spartransformators.

Der Nachteil dieser Schaltung liegt darin, daß sie eines Transformators bedarf, ihr Vorteil darin, daß sich das Verhältnis zwischen Wechsel- und Gleichspannung beliebig einstellen läßt und daß der Strom immer nur

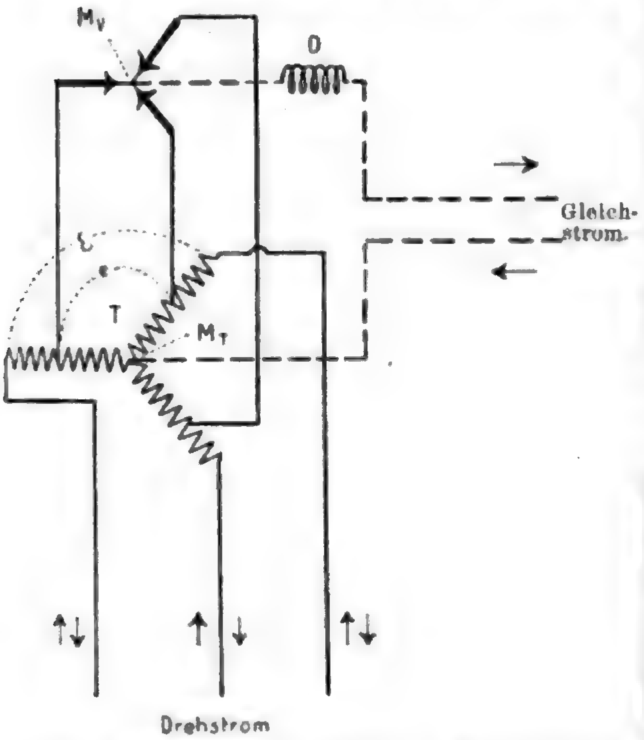


Fig. 4. Transformatorschaltung für Drehstrom.

ein Ventil durchfließt, statt zwei wie bei der Graetzschen Schaltung, so daß die Energieverluste in der Ventilgruppe nur halb so groß sind. Diese beiden Vorzüge wiegen so schwer, daß technisch nur die Transformatorschaltung benutzt wird.

Die Brauchbarkeit der Ventile hängt von der Leichtigkeit ihrer Herstellung oder ihrem Preise, von ihren Spannungs- und Strombereichen, ihrer Lebensdauer und vor allem von ihrem Nutzeffekte ab. Dem idealen Ventile mit den Widerständen Null und unendlich steht das wirkliche Ventil mit den Widertänden r und R gegenüber, in dem Verluste auftreten. Ist V die effektive einphasige Wechselspannung und r_g der Widerstand des Gleichstromverbrauchskörpers, der mit dem Ventil an die Wechselspannung V angeschlossen ist, so fließt in der Flußrichtung der effektive Strom

$$J = \frac{V}{r + r_g},$$

in der Sperrichtung der effektive Strom

$$i = \frac{V}{R + r_g}.$$

Demgemäß betragen die Verluste

$$J^2 . r + i^2 R = V^2 \left(\frac{r}{(r + r_g)^2} + \frac{R}{(R + r_g)^2} \right).$$

Sie erscheinen im Ventile im allgemeinen in Form von Wärme. Ein weiterer Verlust entsteht dadurch, daß in der Sperrrichtung der Strom i durch den Gleichstromverbrauchskörper in der Zeit t eine Elektrizitätsmenge i.t in der der gewünschten entgegengesetzten Richtung hindurchführt. Die schädliche Wirkung dieser Elektrizitätsmenge muß in der Flußrichtung durch die ebenso große Elektrizitätsmenge $J . t_1$ wieder aufgehoben werden. Dadurch entsteht im Verbrauchskörper in der Zeiteinheit insgesamt ein Verlust von dem Betrage

$$\frac{V^2 . r}{R + r_g} \left(\frac{1}{r + r_g} + \frac{1}{R + r_g} \right).$$

Endlich wird noch ein Verlust dadurch bedingt, daß der gleichgerichtete Strom nicht konstant ist. Die folgenden Figuren 5 bis 7 geben die Kurvenform der gleichgerichteten Ströme wieder, wenn der Wechselstrom sinusförmig ist. Figur 5 entsteht, wenn nur die eine Stromrichtung ausgenutzt, die andere unterdrückt wird, Figur 6 wenn einphasiger Wechselstrom, Figur 7 wenn Drehstrom unter Ausnutzung beider Stromrichtungen gleichgerichtet wird. Bezüglich ihrer Wirkung kann man sich alle drei Ströme zusammengesetzt denken aus einem konstanten Gleichstrome i_g, dessen Betrag gleich dem arithmetischen Mittel aus allen Momentanwerten ist und einem darübergelagerten nicht mehr

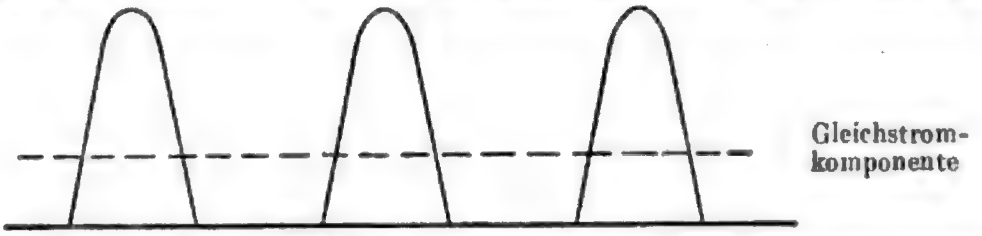


Fig. 5. Kurvenform eines mit Hilfe eines Ventiles gleichgerichteten Wechselstromes.

sinusförmigen Wechselstrome i_w, der um die Grade i_g als Nullinie pulsiert.

Ganz das gleiche gilt für die gleichgerichteten Spannungen e_g und e_w. Als Nutzleistung im Gleichstromverbrauchskörper kommt nur $i_g . e_g$ in Frage, während $i_w . e_w$ in ihm als Verlust auftritt. Da nun die Drosselspulen die Eigenschaft haben, Wechselstrom ohne wesentlichen Energieverlust zu schwächen, so schaltet man in den Gleichstromkreis zur Verkleinerung von i_w und von $i_w . e_w$ eine Drosselspule ein, wie sie in die Figuren 1—4 eingetragen und mit D bezeichnet ist. Sie verwandelt die Kurven der Figuren 6 und 7 in die der Figuren 8 und 9. Je größer der Selbstinduktionskoeffizient der Drosselspule ist, um so mehr dämpft sie die Pulsationen des gleichgerichteten Stromes und um so mehr nähert sich die Stromform der eines konstanten Gleichstromes.

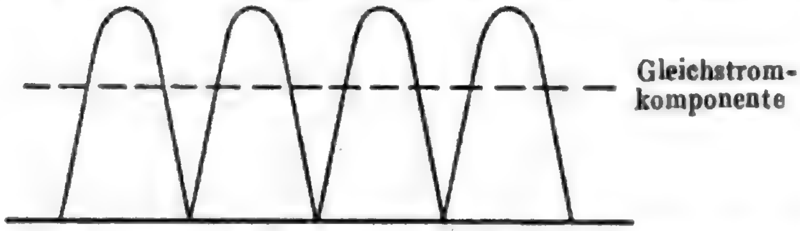


Fig. 6. Kurvenform eines mit Hilfe der Grätzschen oder der Transformatorschaltung gleichgerichteten Wechselstromes.

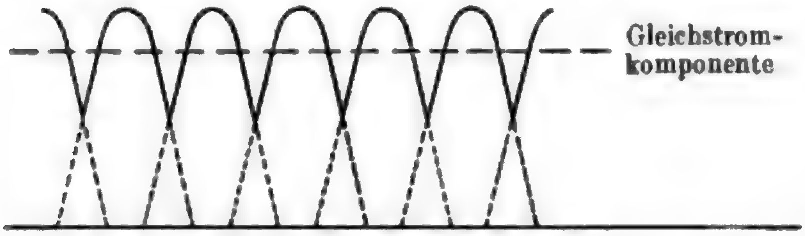


Fig. 7. Kurvenform eines mit Hilfe der Grätzschen oder der Transformatorschaltung gleichgerichteten Drehstromes.

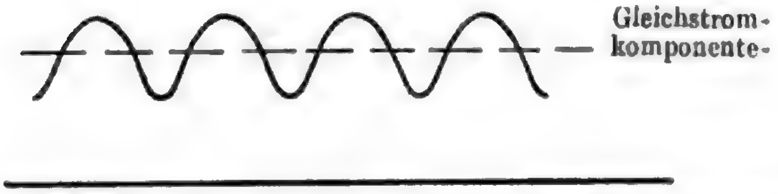


Fig. 8. Kurve der Fig. 6 nach Einschaltung einer Drosselspule.

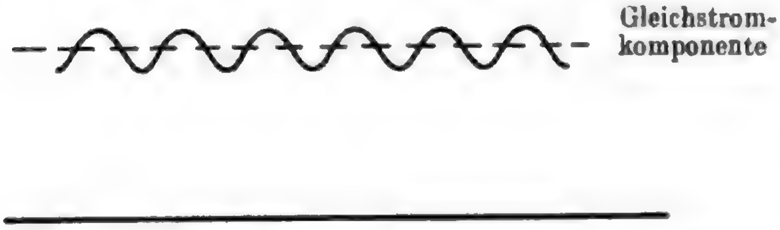


Fig. 9. Kurve der Fig. 7 nach Einschaltung einer Drosselspule.

Die vorstehenden Betrachtungen können im allgemeinen nur einen Ueberblick über die Eigentümlichkeit und den Ort der verschiedenen beim Gleichrichten von Wechselstrom auftretenden Verluste geben. Eine genauere Berechnung der Verluste oder eine Charakterisierung der Ventile durch die Größen R und r ist in den meisten Fällen schon deshalb unmöglich, weil die meisten Ventile keine konstanten Widerstände besitzen. Statt dessen ist bei manchen in der Flußrichtung der Spannungsverlust im Ventile konstant. Aber auch bei konstantem R und r läßt sich kein allgemeiner Nutzeffekt angeben, weil der Widerstand r_g des Gleichstromverbrauchskörpers in die Formeln eingeht, und die meisten Gleichstromverbrauchskörper auch keinen konstanten Widerstand besitzen. Wird z. B. mit Hilfe eines Gleichrichters eine Akkumulatorenbatterie geladen, so dient fast die ganze verfügbare Spannung zur Ueberwindung der nahezu konstanten elektromotorischen Gegenkraft der Batterie. Infolgedessen pulsiert in diesem Falle die Spannung fast gar nicht.

3. Einteilung der Ventile nach dem Prinzip der Grenze. Die Definition eines Ventiles, daß es für die beiden entgegengesetzten Stromrichtungen verschiedene Widerstände besitzt, ist nur der nächste Ausdruck der beobachteten Tatsachen und bedarf einer weiteren Vertiefung. Um diese zu gewinnen, geht man am besten vom Mechanismus der Stromleitung aus. In Metallen besteht der elektrische Strom nur au (negativen) Elektronen, in Gasen aus Elektronen und Ionen, in Elektrolyten nur aus Ionen. In letzterem Falle besteht noch die Eigentümlichkeit, daß die Elektronen niemals aus den Elektroden in den Elektrolyten gelangen. Aus der metallischen Leitung

Digitized by Google

strömen sie auf die Kathode des Elektrolyten zu. Aus dieser könnten sie nur dann in den Elektrolyten einwandern, wenn die Kathode durch den Strom aufgelöst würde, was nicht der Fall ist. Deshalb können negative Ionen im Elektrolyten immer nur durch Dissoziation eines in die Lösung gebrachten Salzes entstehen, während positive Ionen direkt aus der Anode in den Elektrolyten einwandern können.

Auf Grund des Mechanismus der Stromleitung ergibt sich nun die folgende Definition eines elektrischen Ventiles: Ein elektrisches Ventil ist eine Vorkehrung, die den Elektronen oder Ionen in der einen Richtung ein geringeres Hindernis bietet als in der entgegengesetzten. Ein solches Hindernis ist in einem isotropen Körper nicht möglich. Das Charakteristikum eines Ventiles ist also die Grenze zwischen zwei Körpern, in denen sich die Ionen oder Elektronen in verschiedenartiger Weise bewegen, und es sind so viele Arten von Ventilen denkbar, wie es Grenzen gibt. Daraus ergibt sich ohne weiteres die Einteilung der Ventile nach den Grenzen, auf denen sie beruhen. Diese Grenzen sind: 1. Metall—Metall; 2. Gas—Gas; 3. Elektrolyt—Elektrolyt; 4. Metall—Gas; 5. Metall—Elektrolyt; 6) Gas—Elektrolyt.

Die menschliche Unvollkommenheit fügt als siebente Gruppe die Ventile hinzu, deren Wirkungsweise befriedigend zu erklären noch nicht gelungen ist. Es sind insbesondere die Detektoren der Funkentelegraphie.

3a) Die Grenze Metall—Metall; Ventile durch Thermokräfte. Die erste Grenze Metall—Metall läßt sich direkt nicht als Ventil benutzen, weil die an den einzelnen Grenzen auftretenden Wirkungen sich aufheben, sobald die Metalle zu einem Stromkreise geschlossen werden und die Temperatur überall dieselbe ist. Befinden sich dagegen zwei Grenzen auf verschiedener Temperatur, so treten die bekannten Thermokräfte zwischen ihnen auf und liefern Gleichstrom. Die verschiedene Temperatur läßt sich leicht dadurch erreichen, daß man der einen Grenze einen großen, der anderen einen geringen Querschnitt gibt. Dann erwärmt der Wechselstrom die Grenze geringen Querschnitts stärker als die andere.

Man sieht jedoch, daß man hier von einem Gleichrichten des Wechselstromes nicht sprechen darf, da der Wechselstrom zunächst Wärme und diese erst Gleichstrom erzeugt. Irgendeine Beziehung zwischen Kurvenform des Gleichstromes und des Wechselstromes oder ein Unterschied zwischen Fluß- und Sperrichtung ist hier nicht vorhanden. Der Wechselstrom bleibt symmetrisch und lagert sich über den Thermostrom. Erst durch Verwendung von Kapazitäten und Drosselspulen läßt sich eine Trennung der beiden Ströme erzielen. Eine praktische Verwendung haben diese Ventile noch nicht gefunden. Einige Autoren glauben, daß die Kristalldetektoren der Funkentelegraphie hierher gehören, andere widersprechen dem.

3b) Die Grenze Metall—Gas; Gasentladungsventile. Die Grenzen Gas—Gas und Elektrolyt—Elektrolyt sind bisher weder theoretisch noch praktisch zur Konstruktion von Ventilen benutzt worden. Von größter Wichtigkeit ist dagegen die Grenze Metall—Gas. Um Elektronen aus einem kalten Metall in den umgebenden Gasraum zu befördern, sind außerordentlich hohe Spannungen erforderlich. Die zum unmittelbaren Abspalten von Elektronen nötigen Spannungsgefälle sind noch nicht sicher bekannt. Aber auch die Spannungsgefälle, die nötig sind, um die Elektronen indirekt, durch den sogenannten Ionenstoß aus dem Metall zu befreien, sind sehr beträchtlich. Damit Ionenstoß eintreten kann, muß auf der freien Weglänge des positiven Ions mindestens dessen volle Ionisierungsspannung gegen das Kathodenmetall, der „normale Kathodenfall" vorhanden sein. Er schwankt von Metall zu Metall und beträgt im allgemeinen etwa 300 Volt.

Da die freien Weglängen der positiven Ionen bei gewöhnlichem Druck sehr klein sind, so sind sehr hohe Spannungen erforderlich, um mäßige Elektrodenabstände durch den Strom zu überbrücken. Sind z. B. die beiden Elektroden Kugeln von 1 cm Radius, die sich in einer Entfernung von 1 cm gegenüberstehen, so sind 31 200 Volt erforderlich, um die Entladung einzuleiten. Je geringer der Gasdruck wird, um so größer werden die freien Weglängen und um so geringer die zur Ueberbrückung einer gegebenen Entfernung nötige Spannung.

Der normale Kathodenfall kann sich nur ausbilden, solange noch nicht die ganze Fläche der Kathode vom austretenden Strome bedeckt ist und sich über ihr innerhalb der freien Weglänge des positiven Ions kein Hindernis befindet.

α) Ventilwirkung durch anormalen Kathodenfall. Sind diese Bedingungen nicht erfüllt, so entsteht der anormale Kathodenfall, der noch wesentlich größer ist als der normale. Darauf läßt sich ein Ventil gründen. Die eine Elektrode wird so gestaltet, daß an ihr der normale Kathodenfall vorhanden ist, die andere wird klein gemacht, oder besser noch eng mit der Glaswand umgeben, so daß sich an ihr schon bei sehr geringen Strömen der anormale Kathodenfall ausbildet. Liegt die gleichzurichtende Wechselspannung nur wenig oberhalb der Spannung, die zur Erzielung des normalen Kathodenfalles erforderlich ist, so geht in der Richtung, in der der anormale Kathodenfall auftritt, nur ein sehr geringer

Digitized by Google

Strom durch das Ventil. Aber auch in der Flußrichtung ist der Spannungsverlust im Ventile sehr groß. Deshalb hat dieses Ventil keine praktische Bedeutung erlangt und wird nur gelegentlich im Laboratorium benutzt, um geringe Ströme sehr hoher Spannung gleichzurichten, wie sie zur Untersuchung der elektrischen Erscheinungen in Gasen gebraucht werden. Nach der Art der Ausführung unterscheidet man das Spitzenventil, bei dem sich eine Spitze und eine Platte als Elektroden gegenüberstehen, das Trichterröhrenventil, bei dem sich die Glaswand um die eine Elektrode trichterförmig verengt, und das Striktionsventil, bei dem sich zwischen zwei gleichen Elektroden eine trennende Glaswand befindet, die eine nach der einen Elektrode gerichtete trichterförmige Oeffnung trägt. In dieser Oeffnung bildet sich eine sekundäre Kathode, eine sogenannte Striktionskathode aus, die in der einen Richtung normalen, in der anderen anormalen Kathodenfall zeigt. Die nebenstehenden Figuren 10—12 lassen die drei Arten dieser Ventile erkennen.

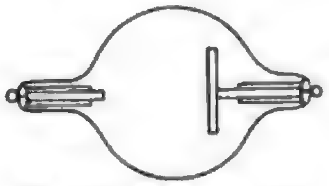


Fig. 10. Spitzenventil.

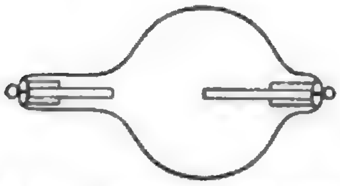


Fig. 11. Trichterröhrenventil.

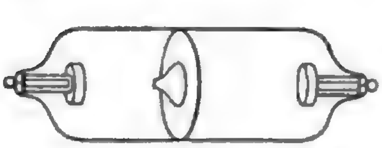


Fig. 12. Striktionsventil.

β) Ventilwirkung durch normalen Kathodenfall. Wichtiger als diese Ventile, bei denen der normale Kathodenfall in der Flußrichtung herrscht, sind die, welche den normalen Kathodenfall für die Sperrichtung benutzen. Liegt die gleichzurichtende Wechselspannung unterhalb der Spannung, die zur Erzielung des normalen Kathodenfalles erforderlich ist, so können keine Elektronen die kalte Metallelektrode verlassen. Der Strom in der Sperrichtung ist Null. Andererseits können die Elektronen ohne weiteres aus dem Gasraume in das Metall hineinströmen. Der Spannungsverlust in der Flußrichtung ist gering. Die Grenze kaltes Metall—Gas ist unterhalb des normalen Kathodenfalles ein sehr vollkommenes Ventil. Es handelt sich nur noch darum, die in der Flußrichtung auf die kalte Metallelektrode aus dem Gasraum strömenden Elektronen mit Hilfe einer zweiten Elektrode unter möglichst geringen Verlusten in den Gasraum hineinzubringen. Nach den hierzu benutzten Verfahren werden die Ventile dieser Gruppe benannt und eingeteilt.

Bei den lichtelektrischen Ventilen werden die Elektronen aus geeigneten Metallen durch Lichtstrahlen herausgeschleudert.

Bei den glühelektrischen Ventilen strahlen Elektroden aus geeignetem Materiale, die auf Weißglut erhitzt sind, Elektronen aus.

Bei den Lichtbogenventilen wird die Temperatur des Lichtbogens der Elektronenemission dienstbar gemacht.

Die lichtelektrischen Ventile. Den lichtelektrischen Effekt, das ist, die freiwillige Ausstrahlung von Elektronen unter der Einwirkung von Lichtstrahlen, zeigen die Metalle um so stärker, je elektropositiver sie sind. Die Elektronen, die bei den stark elektropositiven Metallen nur lose mit den Atomen verbunden sind, geraten durch den Einfluß des Lichtes in Resonanzschwingungen, die so stark werden, daß die Elektronen aus ihrem Atome und wenn dieses an der Oberfläche liegt, aus dem Metall herausfliegen.

Neuerdings haben Elster und Geitel besonders empfindliche photoelektrische Zellen hergestellt. Die innere Glaswand eines mit stark verdünntem Wasserstoff gefüllten Gefäßes wird mit einer Kaliumschicht überzogen und dann ein Glimmstrom hergestellt, so daß die Kaliumschicht mit einem farbigen hochempfindlichen Ueberzuge bedeckt wird. Nach der Herstellung des Ueberzuges wird der Wasserstoff aus dem Gefäße entfernt und statt dessen sehr verdünntes Helium oder Argon eingeleitet, da der Ueberzug in einer Wasserstoffatmosphäre seine Empfindlichkeit mit der Zeit verliert. Bei diesen Zellen ist nicht nur keine äußere Spannung erforderlich, um die Elektronen dem Metalle zu entziehen, sondern die Elektronen erzeugen bei ihrem Austritt sogar selbst eine Spannung bis zu vier Volt.

Stellt man also einer solchen lichtempfindlichen Kaliumelektrode als zweite Elektrode ein Drahtnetz gegenüber, durch das das Licht hindurchströmen kann, so hat man ein recht vollkommenes Ventil, das als einzige Hilfskraft Licht braucht. Leider ist es nur für sehr geringe Ströme verwendbar, denn der Strom in der Flußrichtung kann unter keinen Umständen stärker werden, als der Menge der lichtelektrisch ausgestrahlten

Digitized by Google

Elektronen entspricht. Deshalb ist auch dieses Ventil für die Starkstromtechnik nicht verwendbar

Die glühelektrischen Ventile. Wehneltrohr, Vakuumventil, Flammenventil. Eine wesentlich stärkere Strombelastung vertragen die glühelektrischen Ventile. Das wichtigste von ihnen ist das nach seinem Erfinder genannte Wehneltventilrohr. Bei ihm dient als elektronenstrahlende Elektrode ein dünnes Platinblech, das mit den Oxyden der Erdalkalien bestrichen ist und auf etwa 1400° C erhitzt wird. Bei dieser Temperatur geben die erwähnten Oxyde schon bei ganz geringem Spannungsgefälle große Mengen von Elektronen ab. Die Erhitzung des Platinbleches erfolgt durch einen besonderen Hilfsstromkreis, der durch eine Akkumulatorenbatterie oder einen kleinen Transformator gespeist wird. Die Anoden des Ventilrohres, also das eigentliche Ventil ist ein Stahlstab. Das Gefäß muß so weit wie möglich evakuiert sein, um den Elektronen einen hindernisfreien Weg zur Anode zu bieten. Sollen beide Stromrichtungen des Wechselstromes ausgenutzt werden, so kombiniert man zwei Ventile, indem man zwei Anoden mit einer gemeinsamen Kathode in einem Gefäße vereinigt.

Wehnelt beschreibt ein Ventilrohr, dessen Kathode aus einem Platinblech von 8 qcm Oberfläche und dessen Anoden aus 10 cm langen und 5 mm starken blanken Stahlstäben bestanden. Das Ventilrohr läßt sich mit einer Stromstärke von 2 bis 3 Ampere pro Quadratzentimeter Kathode, also im ganzen mit etwa 20 Ampere belasten. Wird die zulässige Stromstärke überschritten, so tritt an der Kathode ein schnell mit der Stromstärke wachsender Kathodenfall auf, weil dann die Erhitzung der Kathode allein nicht mehr die hinreichende Menge Elektronen liefern kann und die fehlenden durch Ionenstoß gewonnen werden müssen. Die Ventilwirkung ist sehr vollkommen, solange die Anode kalt bleibt. Die zur Erzeugung eines merklichen Stromes in der Sperrichtung erforderliche Spannung beträgt viele Tausend Volt (genaueres siehe beim Quecksilberdampfgleichrichter, bei dem ganz analoge Verhältnisse vorliegen). In der Flußrichtung verbraucht das Wehneltventilrohr annähernd unabhängig von der Stromstärke 18 bis 20 Volt. Sein Nutzeffekt ist also um so größer, je höher die gleichgerichtete Spannung ist, solange sie unterhalb des dem normalen Kathodenfall entsprechenden Wertes bleibt.

Unerläßliche Bedingung für gute Wirksamkeit des Ventiles ist die peinlichste Sauberkeit bei der Herstellung. Schon Spuren von Kohlenwasserstoffen bewirken eine Zersetzung der Oxyde und Bildung von Karbiden, die sich in Form schwarzer Niederschläge an den Glaswänden absetzen und das Platin angreifen. Auch bei sorgfältiger Behandlung bleibt die glühende Platinkathode ein sehr empfindlicher Teil des Ventilrohres. Glüht das Platinblech aus irgend einem Grunde an einer Stelle stärker als an den übrigen, so konzentriert sich der Elektronenstrom auf diese Stelle und erhitzt sie dadurch noch stärker. Die Folge ist eine weitere Konzentration des Stromes und so fort bis das Platinblech durchgebrannt ist. Man hat deshalb versucht, höher schmelzende Metalle zu verwenden, ohne bisher rechte Erfolge damit zu erzielen. Insbesondere wird das wegen seines hohen Schmelzpunktes und seiner leichten Bearbeitbarkeit recht geeignet erscheinende Tantal infolge seiner Gier, sich bei hoher Temperatur mit fast allen Gasen zu verbinden, bald spröde und rissig.

Der Vorzug des Wehneltventilrohres besteht darin, daß es sich im Laboratorium ohne besondere Schwierigkeiten herstellen läßt und von den kleinsten bis zu relativ hohen Stromstärken in recht vollkommener Weise und mit hohem Nutzeffekt gleichrichtet. Der Nachteil besteht in der Notwendigkeit des Hilfsstromkreises und der Empfindlichkeit der Platinkathode.

Eine Abart der Wehneltventilrohre sind die zuerst von Fleming beschriebenen und Vakuumventile benannten Apparate. Sie bestehen aus einer elektrischen Kohleglühlampe mit zwei voneinander isolierten Kohlefäden, deren einer ebenso wie die Wehneltkathode durch einen Hilfsstromkreis geglüht wird, während der andere kalt bleibt. Die Erscheinungen sind qualitativ ganz dieselben wie beim Wehneltventilrohr.

Die für die glühelektrischen Erscheinungen erforderliche Temperatur läßt sich auch durch Erhitzen der Kathode in der Flamme, insbesondere im Bunsenbrenner erzielen (Flammenventile). Die störende geringe Leitfähigkeit der Bunsenflamme läßt sich durch Einführung von Salzdämpfen z. B. von KBr leicht auf das Hundertfache verstärken. Träger des Stromes ist in der Flamme vorwiegend das negative Ion oder das Elektron, dessen Beweglichkeit zwanzigmal so groß ist wie die des positiven Ions. Die Anode muß so angeordnet sein, daß sie von den Salzdämpfen nicht umspült wird, da sie sonst in der Sperrichtung als Kathode mit Hilfe der von den Salzdämpfen gelieferten negativen Teilchen Strom liefern würde, und außerdem muß sie so dimensioniert sein, daß sie durch die Flamme nicht auf Glühtemperatur erhitzt werden kann. Ordnet man sie außerhalb der Flamme an, so wird der Widerstand zwischen ihr und der Flamme sehr groß.

Die praktische Bedeutung der Flammenventile ist viel geringer als die des Wehnelt- und des Vakuumventils.

Digitized by Google

Alle glühelektrischen Ventile lassen sich bis zu den höchsten Frequenzen hinauf zum Gleichrichten benutzen, da sie Elektronenventile sind und die träge Masse der Elektronen äußerst gering ist. Oder, weil elektrische Schwingungen nur durch Elektronenbewegungen hervorgerufen werden können, so müssen die Elektronen andererseits auch zur Umformung solcher Schwingungen fähig sein. In der Hochfrequenztechnik verwendet man die Ventile nun fast ausschließlich zum Gleichrichten von Meßströmen, weil es für Gleichströme viel empfindlichere und bequemere Meßapparate gibt als für Wechselströme. Für Meßzwecke, ganz besonders wenn Nullmethoden in Frage kommen, ist es aber unerläßlich, daß zugleich mit dem Meßstrome auch die Spannung, die er verbraucht, Null wird. Das ist aber, wie erwähnt, bei den glühelektrischen Ventilen nicht der Fall. Bis zu sehr geringen Stromstärken hinunter beträgt der Spannungsverlust konstant 18 bis 20 Volt. Man kann jedoch diesen Uebelstand stark verringern, wenn man mit dem Ventile eine Hilfsbatterie von fast 18 Volt in Serie schaltet. Dann ist die Batterie allein auch in der Flußrichtung nicht imstande, einen merklichen Strom durch das Ventil zu schicken, aber schon eine geringe Spannungserhöhung durch den gleichzurichtenden Meßstrom genügt, um einen kräftigen Gleichstrom zustande kommen zu lassen. Von Proportionalität zwischen Meßstrom und Gleichstrom ist allerdings in keinem Falle die Rede. Aber die Benutzung der glühelektrischen Ventile zur Messung der Größe des gleichzurichtenden Stromes nach der Ausschlagmethode ist schon deshalb nicht ausführbar, weil die Leitfähigkeit und der Spannungsverlust in den Ventilen viel zu sehr von dem kaum kontrollierbaren Glühzustande der Kathode abhängig ist.

Lichtbogenventile. Quecksilbergleichrichter. Das dritte Verfahren, die Elektronen in den Gasraum zu überführen, nämlich die Erhitzung der Kathode durch einen Lichtbogen, ist das wirksamste. Bei der Temperatur des Lichtbogens liefert die Kathode beliebige Mengen von Elektronen bei einem Spannungsverluste, der je nach dem Material der Kathode zwischen 5 und 10 Volt schwankt. Der Lichtbogen selbst erscheint allerdings auf den ersten Blick keiner Ventilwirkung fähig, weil ja die Anode des Lichtbogens mindestens ebenso heiß wird wie die Kathode und eine aus dem Bogen herausgerückte Hilfsanode zwar kalt bleiben, aber auch einen sehr hohen Widerstand zur Folge haben würde. Trotzdem wirkt ein Lichtbogen, der aus einer Metall- und einer Kohleelektrode besteht, als Ventil, sobald er über 4 mm lang ist. Der Grund ist der, daß sich zwar die Metallelektrode auch auf der Lichtbogentemperatur befindet, solange sie Anode ist, daß sie aber beim Aufhören des anodischen Stromstoßes diese Temperatur durch Strahlung und Wärmeleitung mit außerordentlicher Geschwindigkeit verliert. Da der Strom im Lichtbogen aufhört, sobald die Spannung unter die Minimalspannung des Lichtbogens (10 bis 40 Volt) sinkt und erst wieder beginnen kann, wenn die Spannung diesen Betrag wieder erreicht hat, so entsteht bei jedem Stromwechsel eine kleine Pause. Und diese genügt, um die Metallanode soweit abzukühlen, daß sich kein Lichtbogen wieder bilden kann, wenn das Metall Kathode wird. Eingehende Versuche hierüber haben ergeben, daß der Lichtbogen nach einer Stromunterbrechung von $^1/_{10000}$ Sekunde sich schon nicht wieder bilden kann, wenn die Kathode ein Metall ist. Die Kohle dagegen behält infolge ihrer sehr geringen Wärmeleitfähigkeit und vielleicht auch infolge lebhafter Verbrennungsprozesse, die zur Wiederbildung des Lichtbogens erforderliche Temperatur über eine halbe Periode des Wechselstromes, falls deren Dauer nicht eine zwanzigstel Sekunde überschreitet. Außerdem kommt vielleicht noch hinzu, daß die Kohle bei der Abkühlung die Fähigkeit der Elektronenemission nicht so schnell verliert wie die Metalle.

Bei einer Lichtbogenlänge von weniger als vier Millimetern wird die Abkühlung der Metallelektrode durch die Bestrahlung von der nahen Kohleelektrode her soweit verzögert, daß auch in der Sperrichtung noch ein Lichtbogen zustande kommt.

Auch bei diesem Ventile verbieten zunächst zahlreiche Mängel die technische Verwendung. Insbesondere ist der Spannungsverlust in der Flußrichtung viel zu hoch und der starke Abbrand der Elektroden verlangt, abgesehen von den Kosten des Materiales, dauernde Ueberwachung und Wartung des Apparates. Und doch gelang es dem Amerikaner Cooper-Hewitt, ein Lichtbogenventil zu konstruieren, das allen Forderungen der Technik genügt und als einziges aller Ventile in großem Maße zum Gleichrichten verwendet wird, und zwar mit Hilfe einer Anordnung, die das Lichtbogenventil zunächst auf den Kopf zu stellen scheint. Cooper-Hewitt verwandte nämlich als Anode Kohle und als Kathode Metall und zwar Quecksilber. Er gab also einerseits den Vorteil auf, daß die Kathode die Lichtbogentemperatur über eine halbe Periode behält, und mußte andererseits Vorkehrungen treffen, die das Erhitzen der Kohleanode auf Lichtbogentemperatur verhinderten. Das erreichte er, indem er die Elektroden in ein Glasgefäß einschloß, aus dem die Fremdgase mit äußerster Sorgfalt entfernt waren, so daß es nur von der Quecksilberkathode her Quecksilberdampf in großer Verdünnung enthielt. Durch diese

Digitized by Google

Anordnung gewann er mehrere sehr wesentliche Vorteile.

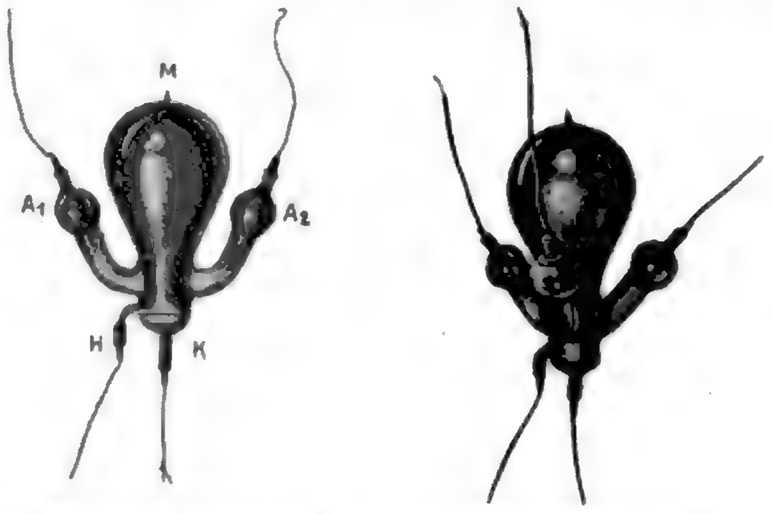
Zunächst tritt der Strom eines Vakuumlichtbogens gleichmäßig verteilt in die ganze Anodenoberfläche ein, und erhitzt sie infolgedessen bei genügend großer Anode nur wenig. Zweitens besitzt ionisierter Quecksilberdampf eine hervorragende Leitfähigkeit, so daß man die Anode ziemlich weit von der Kathode entfernen und sie vor ihrer Strahlung schützen kann, ohne einen wesentlichen Spannungsverlust in der Gasstrecke zu bekommen. Endlich rinnt das Quecksilber, das infolge der hohen Temperatur der Kathode verdampft ist, nach seiner Kondensation an den Glaswänden einer Kühlkammer von selbst wieder zur Kathode zurück. Die Lebensdauer des Ventiles ist also fast unbeschränkt, und es bedarf keinerlei besonderen Wartung. Endlich läßt sich sogar sein einziger Mangel, daß es nicht selbsttätig ist, in vielen Fällen überwinden. An sich erfolgt das Erlöschen des Quecksilbervakuumlichtbogens noch leichter als das eines gewöhnlichen Lichtbogens. Da nämlich die zur Elektronenemission an der Kathode erforderliche Temperatur weit über dem Siedepunkte des Quecksilbers liegt, bewirkt sie eine äußerst turbulente Verdampfung. Die Folge davon ist, daß die Stelle, von der der Strom an der Kathode ausgeht, und an der allein die hohe Temperatur herrscht, der sogenannte Kathodenfleck von etwa 1 qmm Größe, wild auf dem Quecksilber umhertanzt. Dadurch wird die Abkühlung dieses Fleckes durch Wärmeleitung und die Neigung des Lichtbogens, zu erlöschen, so sehr verstärkt, daß es nicht möglich ist, ihn unterhalb von zwei Ampere aufrecht zu erhalten. Eine kleine Verbesserung läßt sich dadurch erzielen, daß man eine bis nahe an die Oberfläche ragende Platinspitze im Quecksilber anbringt.

Dann setzt sich der Lichtbogen an dieser Stelle fest und bleibt bis etwa 1 Ampere bestehen. Doch ist die Lebensdauer der Platinspitze beschränkt.

Um also einen Quecksilberdampfgleichrichter selbsttätig zu machen, darf man den Strom an der Kathode, das ist den gleichgerichteten Strom, nie unter 2 Ampere sinken lassen. Nun verwendet man zur technischen Gleichrichtung von Wechselströmen ausschließlich die Transformatorschaltung, indem man bei Einphasenstrom zwei, bei Drehstrom drei Anoden mit gemeinsamer Kathode zu einem Apparate kombiniert. Die Figuren 6 und 7 enthalten schematisch die entstehenden Kurvenformen des Gleichstromes. Da zeigt sich, daß bei Drehstrom die Bedingung, daß der Strom an der Kathode nie unter zwei Ampere sinken darf, bei genügender Stromstärke ohne weiteres erfüllt ist. Ein einmal in Betrieb gesetzter Drehstromgleichrichter ist ohne weiteres selbsttätig. Ein Einphasengleichrichter dagegen nicht, da bei ihm der Strom in jeder Periode zweimal auf den Wert Null sinkt. Doch lehrt ein Blick auf Figur 8, daß sich dem leicht abhelfen läßt, wenn eine Drosselspule in den Gleichstromkreis geschaltet wird. Durch dieses einfache Mittel läßt sich also auch der Einphasengleichrichter selbsttätig machen.

Die Inbetriebsetzung des Quecksilbergleichrichters oder die Herstellung der Lichtbogentemperatur an der Kathode erfolgt durch einen Oeffnungsfunken. Neben der Quecksilberkathode wird eine Hilfselektrode aus Quecksilber angeordnet, die mit einer der Anoden durch einen so bemessenen Widerstand verbunden wird, daß höchstens ein Ampere zustande kommen kann. Durch Kippen des Gleichrichtergefäßes bringt man das Quecksilber der Kathode mit dem der Hilfselektrode in Berührung und unterbricht den entstandenen Strom durch Trennung der beiden Quecksilberkuppen wieder. Der Oeffnungsfunke leitet den Lichtbogen zwischen den Anoden und der Kathode ein.

Figur 13 zeigt die jetzt übliche Form des Quecksilbergleichrichters. A_1 A_2 sind die Anoden, die meist aus Graphitzylindern, gelegentlich auch aus Eisenglocken bestehen. Das Eisen hat jedoch die unangenehme Eigenschaft, sehr leicht allmählich zu zerstäuben und die Wände des Glasgefäßes mit einem häßlichen schwarzen Belage zu überziehen. K ist die Kathode, H die Hilfselektrode und M eine Kühlkammer zur Ab-



Einphasen-Gleichrichter Drehstrom-Gleichrichter
Fig. 13.

Digitized by Google

leitung der Wärme und Kondensation des verdampften Quecksilbers.

Der Spannungsverlust im Gleichrichter verteilt sich zu etwa gleichen Teilen von je 5 Volt auf den Kathodenfall, den Anodenfall und den Verlust in der Gasstrecke. Die beiden ersten sind von der Stromstärke fast ganz unabhängig, der letzte nimmt mit steigender Stromstärke wenig ab, so daß der Gleichrichter im ganzen eine etwas fallende Charakteristik besitzt und 15 bis 18 Volt verzehrt, wenn er mäßige Spannungen gleichrichten soll. Zum Gleichrichten von Hochspannung müssen die Seitenarme verlängert werden, so daß dann etwas über 20 Volt verbraucht werden.

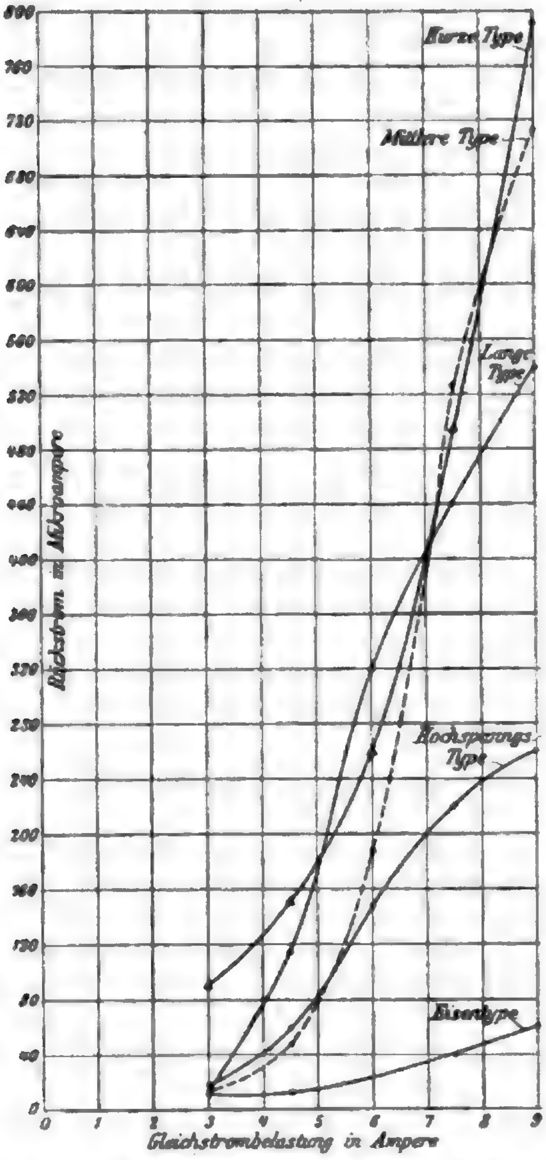


Fig. 14. Abhängigkeit des mittleren Rückstromes verschiedener Quecksilbergleichrichter für einphasigen Wechselstrom von der Gleichstrombelastung bei 240 V Wechselspannung zwischen den Anoden.

Die strenge Erfüllung der Bedingung des Metall — Gas-Ventiles, daß es kalt sein soll, würde beim Quecksilbergleichrichter zu unbequem großen Anoden führen. Man gibt ihnen deshalb im allgemeinen solche Abmessungen, daß sie bei voller Belastung dunkel rotglühend werden. Auch bei dieser Temperatur ist der in der Sperrrichtung fließende Strom sehr gering. G. Schulze maß seine Größe in Abhängigkeit von der Belastung des Gleichrichters und seine Kurvenform, indem er durch einen synchron mit dem gleichgerichteten Wechselstrom rotierenden Kontakt und einen zweiten als Ventil geschalteten Gleichrichter den starken Strom der Flußrichtung vom Meßkreise vollständig fernhielt. Die Figuren 14 und 15 sowie Tabelle I zeigen die wichtigsten Ergebnisse der Messungen. Bei der Beurteilung des Nutzeffektes des Gleichrichters ist dieser Strom in der Sperrichtung vollständig zu vernachlässigen. Dagegen mahnt sein schnelles Ansteigen mit der Belastung zur Vorsicht bei Ueberlastungen, da besonders bei größeren Typen bald der kritische Punkt erreicht wird, wo dieser Strom die Anode selbst merklich erhitzt und dadurch sich selbst immer weiter verstärkt, bis der Gleichrichter in beiden Richtungen

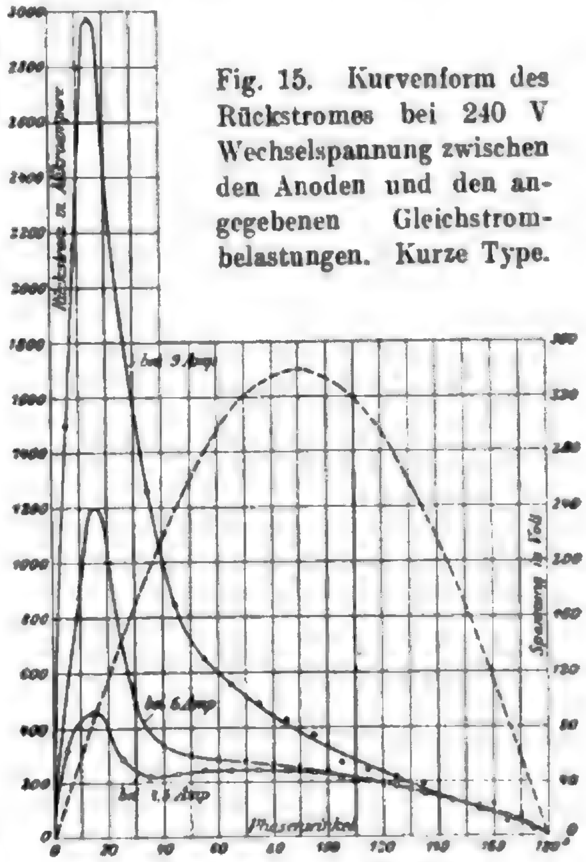


Fig. 15. Kurvenform des Rückstromes bei 240 V Wechselspannung zwischen den Anoden und den angegebenen Gleichstrombelastungen. Kurze Type.

durchlässig wird, was besonders bei Batterieladung leicht zur Zerstörung des Gleichrichters führt.

Der Wirkungsgrad des Gleichrichters ergibt sich aus dem Spannungsverlust von etwa 15 Volt in der Flußrichtung. Er beträgt also bei einer mittleren gleichgerichteten Spannung von

Digitized by Google

Tabelle I.
Dimensionen der in den Figg. 14 und 15 angegebenen Gleichrichtertypen.

Bezeichnung	Normale Stromstärke	Anodenmaterial	Gesamtanodenoberfläche	Länge der Seitenarme von der Achse des Gefäßes bis Mitte der Anode
Kurze Type	5 Amp.	Graphitzylinder	11 qcm	5,4 cm
Mittlere Type	„	„	„	7,8 „
Lange Type	„	„	„	10,5 „
Hochspannungstype	„	„	„	20 „
Eisentype	10 Amp.	Eisenglocken	48 qcm	1,45 „

15 Volt	50%
150 „	90%
1500 „	99%

Eine obere Grenze für die Spannung existiert nicht, wohl aber eine untere für den Strom. Sobald der Strom auf etwa zwei Ampere sinkt, muß der Gleichrichter erlöschen. Bei Batterieladung kann man diese Eigenschaft zum automatischen Unterbrechens des Gleichrichters beim Ende der Ladung benutzen.

Die Lebensdauer der Gleichrichtertype für 10 Ampere Gleichstrom ist sehr groß. In der Reichsanstalt sind Gleichrichter seit über 13000 Stunden im Betriebe. Die Lebensdauer der größeren Typen ist wesentlich geringer.

Die folgenden Figuren 16 und 17 zeigen Kurven, die mit einem Oszillographen an Gleichrichtern der Westinghouse E.-G. für 10 Ampere aufgenommen sind, und bedürfen wohl nach dem Voraufgegangenen keiner weiteren Erläuterung.

Der von **Bela Schäfer** angegebene Quecksilbergleichrichter für hohe Stromstärken scheint sich noch im Versuchsstadium zu befinden.

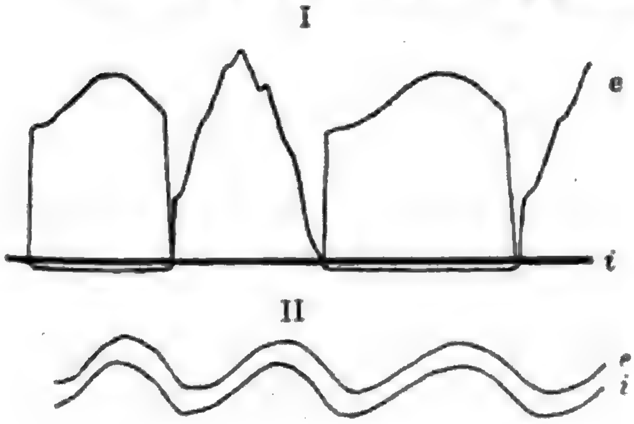


Fig. 16. Oszillogramme eines Einphasenquecksilbergleichrichters mit Drosselspule im Gleichstromkreise. e Spannung, i Strom. I eines Zweiges (Ventiles), II des Gleichstromverbrauchskörpers (Glühlampen).

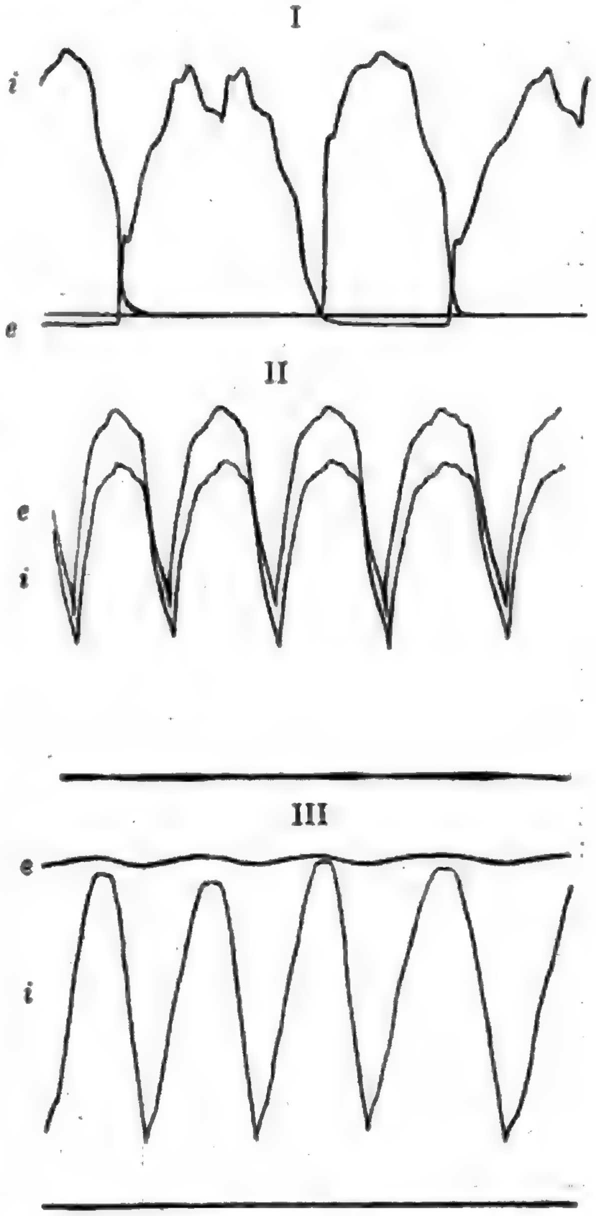


Fig. 17. Oszillogramme eines Drehstromquecksilbergleichrichters ohne Drosselspule im Gleichstromkreise. e Spannung, i Strom, I eines Zweiges (Ventiles), II des Gleichstromverbrauchskörpers (Glühlampen), III des Gleichstromverbrauchskörpers (Akkumulatorenbatterie).

Digitized by Google

Für Laboratorien ist die Benutzung des Quecksilbergleichrichters als statisches Ventil und zum Gleichrichten schwacher Ströme wichtig. Da der Gleichrichter in diesem Falle nicht selbsttätig ist, stellt man mit einer Hilfsbatterie von etwa 40 Volt zwischen einer Anode und der Kathode des Gleichrichters einen Gleichstromlichtbogen von etwa 4 Ampere her, wobei außer dem erforderlichen Vorschaltwiderstande vorteilhaft noch eine Drosselspule in den Stromkreis geschaltet wird, um das Erlöschen des Lichtbogens zu erschweren. Den Lichtbogen durch Vergrößerung der Stromstärke stabiler zu machen, empfiehlt sich nicht, da bei größeren Strömen in der Gleichrichtung bisweilen Störungen eintreten.

Die anderen Anoden bilden nun zusammen mit der Kathode die Ventile für die schwachen Ströme. Da sie jetzt kalt bleiben, ist, wie auch eine Extrapolation der Figur 14 auf geringe Stromstärken ergibt, der Strom in der Sperrichtung äußerst gering und die Gleichrichtung eine ebenso vollkommene wie beim Wehneltgleichrichter, mit dem der Apparat jetzt eine große Aehnlichkeit hat. Auch sein Spannungsverlust beträgt bei schwachen Strömen 18 bis 20 Volt. Er hat aber vor dem Wehneltventil mit dem empfindlichen Platinblech den Vorzug unbedingter Betriebssicherheit.

Auch bei der technischen Gleichrichtung von Hochspannung wird man vielfach den Hilfslichtbogen nicht entbehren können, da die Ströme bei Hochspannung vielfach nicht den Betrag von zwei Ampere erreichen.

3c) Die Grenze Metall—Elektrolyt. Die Grenze Metall—Elektrolyt gestattet eine außerordentliche Menge von Kombinationen. Ihre Ventilwirkung beruht darauf, daß jedes Anion oder Kation zu seiner dauernden Abscheidung an der Anode oder Kathode bei jeder Konzentration einer ganz bestimmten Spannung bedarf. Unterhalb dieser Spannung findet die Abscheidung nur in äußerst geringen mit der Spannung steigenden Mengen statt, so daß nur geringe Stromstöße beim Einschalten der Spannung aber kein wesentlicher Dauerstrom möglich ist. Ein sehr geringer Strom kommt allerdings auch unterhalb der Abscheidungsspannung dadurch zustande, daß die der angewandten Spannung entsprechenden abgeschiedenen Spuren durch Diffusion dauernd langsam wieder verschwinden.

Die Verwendung der Metall-Elektrolytventile wird durch zwei große Mängel sehr eingeschränkt. Erstens erheben sich die Abscheidungsspannungen, bis zu denen Ventilwirkung möglich ist, kaum über ein Volt.

Zweitens stellen sie sich, wie erwähnt, erst her, nachdem eine gewisse Strommenge geflossen ist und Spuren des betreffenden Ions abgeschieden hat. So belanglos diese Strommenge bei der statischen Verwendung der Ventile ist, so verderblich ist sie, wenn das Ventil zum Gleichrichten von Wechselstrom benutzt werden soll. Bei fünfzigperiodigem Wechselstrom steht dem Strom jedesmal nur $^1/_{100}$ Sekunde zur Abscheidung und Wiederauflösung der Spuren zur Verfügung. Infolgedessen muß die Intensität des Stromes verhältnismäßig groß werden, damit die erforderliche Elektrizitätsmenge geliefert wird. Es besteht also in beiden Richtungen zunächst Durchlässigkeit. Verfolgt man die Frage rechnerisch, so zeigt sich ganz allgemein, daß bei normalem fünfzigperiodigem Wechselstrome und zulässigen Stromdichten überhaupt keine nennenswerte Gleichrichtung möglich ist, sobald elektrolytische Ionenreaktionen ins Spiel kommen.

Hierbei ist gleiche Größe der beiden Elektroden vorausgesetzt. Bei starker Unsymmetrie der Elektroden ergeben sich andere Erscheinungen, die bei den Detektoren näher behandelt werden sollen, da sie nur bei diesen Anwendung gefunden haben.

Trotz ihres geringen Spannungsbereiches hat die Ventilwirkung der Grenze Metall-Elektrolyt bei einer besonderen Schaltung der elektrolytischen Stiazähler eine interessante praktische Anwendung gefunden. Die Anode der Stiazähler besteht aus Quecksilber, die Kathode aus einem Platiniridiumblech und der Elektrolyt aus einer wässerigen Lösung von K_2HgJ_4. Diese Zelle liegt zusammen mit einem Vorschaltwiderstande, der ihren negativen Temperaturkoeffizienten kompensieren soll, an einem Nebenschlußwiderstande, durch den der größte Teil des zu messenden Stromes fließt. Bei einem mäßigen Strome entsteht in der Richtung vom Quecksilber zum Platiniridium keine elektromotorische Gegenkraft, da an der Anode Quecksilber gelöst und an der Kathode die gleiche Menge Quecksilber abgeschieden wird. In der entgegengesetzten Richtung aber ist Stromdurchgang nur unter Jodabscheidung an der Platiniridiumanode möglich, wozu eine Spannung von 0,6 Volt erforderlich ist. Bis zu dieser Spannung wirkt die Zelle wie ein recht vollkommenes statisches Ventil. Die Anwendung dieses Ventiles läßt Figur 18 erkennen. Zwei Ventile V_1 und V_2 sind mit entgegengesetzten Polen an den gemeinsamen Nebenschluß N angeschlossen. Letzterer ist so bemessen, daß der Spannungsverlust an ihm bei voller Belastung unter 0,6 Volt liegt. Infolgedessen kann in der Stromrichtung 1 nur durch die Zelle V_1, in der Stromrichtung 2 nur durch die Zelle V_2 Strom fließen. Schaltet man also den Apparat in die Zuleitung einer Akkumulatorenbatterie, so zählt V_1 nur die Ladestrommenge,

Digitized by Google

V_2 nur die Entladestrommenge, ohne daß irgendwelche Umschaltungen vorgenommen zu werden brauchen.

Schaltet man jede der beiden Zellen mit einem trägen Relais in Serie, so gestattet die Anordnung als Steuerorgan eine mannigfache Anwendung.

3d) Die Grenze Gas-Elektrolyt; Elektrolyt-Gleichrichter. Auf der Ventilwirkung der Grenze Gas-Elektrolyt dürften nach einer von G. Schulze aufgestellten Theorie die sogenannten Elektrolyt-Gleichrichter beruhen. So hoch das Spannungsgefälle ist, das man braucht, um Elek-

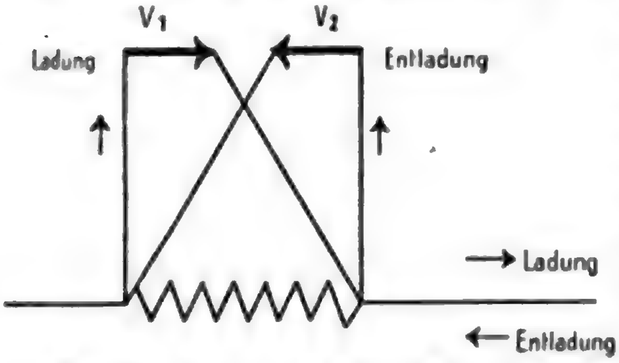


Fig. 18. Schaltung der Batterie-Stiazähler.

tronen durch Ionenstoß aus einer kalten Metallelektrode freizumachen, um so viel höher scheint das Spannungsgefälle zu sein, das erforderlich ist, um Elektronen aus einer kalten Elektrolyt-Elektrode in den Gasraum zu überführen, besonders wenn der Abstand zwischen Anode und Kathode, oder die Dicke des Gasraumes so gering gemacht wird, daß die Elektrisierung durch Ionenstoß nicht mehr stattfinden kann. Trennt man also eine Elektrolyt-Elektrode und eine Metall-Elektrode durch einen sehr schmalen Gasraum, so entsteht ein Ventil, wenn auch kein sehr vollkommenes, weil auch in der Flußrichtung ein verhältnismäßig hoher Spannungsverlust eintritt. Diese Anordnung, die künstlich herzustellen aus verschiedenen Gründen unmöglich ist, bildet sich nun selbsttätig bei der Formierung eines Ventilmetalls, wobei sich folgende Erscheinungen abspielen.

Wenn man eine Zelle, die aus einem Ventilmetall als Anode, einem geeigneten Elektrolyten und einer beliebigen unlöslichen Kathode gebildet ist, mit konstantem Gleichstrom belastet, so sieht man zunächst wie bei einer gewöhnlichen Polarisationszelle nur Entwicklung von Sauerstoff an der Anode und von Wasserstoff an der Kathode. Legt man aber einen Spannungsmesser an die Zelle, so zeigt sich, daß die Spannung an ihr nicht wie an der gewöhnlichen Polarisationszelle dauernd etwa 2 bis 3 Volt beträgt, sondern schnell steigt, während der Strom zu sinken sucht. Hat die Stromquelle nur eine mäßige elektromotorische Kraft von vielleicht 100 Volt, so hat man in dem Bestreben, den Strom aufrecht zu erhalten, bald den gesamten Vorschaltwiderstand ausgeschaltet, worauf der Strom bald bis auf verschwindend geringe Werte sinkt, während an der Zelle die volle Spannung von 100 Volt liegt. Die Zelle ist bis 100 Volt „formiert". Hat man die Ventilanode vor der Formierung poliert, so erscheinen an ihr einige Zeit nach Beginn der Formierung schöne Interferenzfarben, die mit Violett beginnend bei genügend hoher Betriebsspannung etwa dreimal das Spektrum durchwandern, worauf sie verblassen und die sie verursachende poröse Oxydschicht als äußerst dünner weißlicher harter Ueberzug sichtbar wird. Die Spannung ist inzwischen auf mehrere Hundert Volt gestiegen. Die Ventilanode ist jetzt von den in Figur 19 schematisch angegebenen Schichten bedeckt.

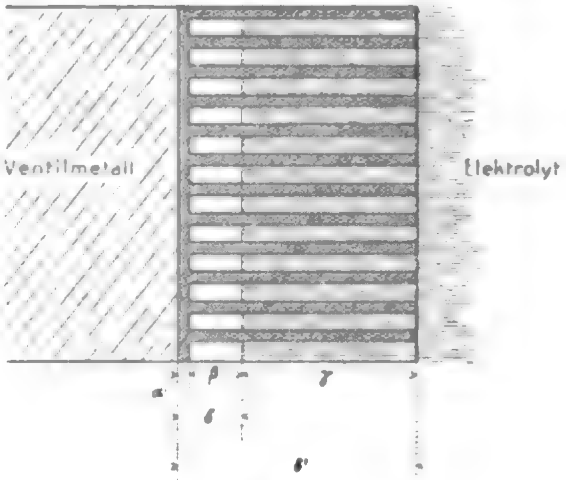


Fig. 19.

δ' ist die gesamte entstandene poröse Oxydschicht. Sie besteht aus den folgenden Teilen:

1. α, der das Ventilmetall stets bedeckenden lückenlosen Oxydschicht, die dauernd vorhanden sein muß, weil alle Ventilmetalle große Verwandtschaft zum Sauerstoff besitzen.

2. β, der durch den entwickelten Sauerstoff gebildeten äußerst dünnen durch das Gerüst der porösen Oxydschicht gestützten Gasschicht.

3. γ, dem vom Elektrolyten erfüllten Teile der festen Oxydschicht. Er hat einen wesentlich höheren Widerstand als der Elektrolyt, aber sein Widerstand kommt gegen den der Gasschicht nicht in Frage. Letzterer ist für eine formierte Zelle in der Richtung vom Metall zum Elektrolyten außerordentlich hoch, solange die Spannung an der Zelle unterhalb der Formierungsspannung liegt. Da die Gasschicht außerdem sehr dünn ist,

Digitized by Google

so besitzt das System Metall-Gasschicht-Elektrolyt eine beträchtliche elektrostatische Kapazität, deren Dielektrikum eben die Gasschicht ist. Durch Messung dieser Kapazität würde man die Dicke der Gasschicht finden können, wenn ihre Dielektrizitätskonstante bekannt wäre. Da das nicht der Fall ist, begnügt man sich mit der Bestimmung der relativen Dicke der Gasschicht, die man erhält, wenn man die Dielektrizitätskonstante gleich eins setzt. In derselben Weise kann man die Dicke δ' der gesamten porösen Schicht ermitteln, wenn man sie sorgfältig trocknet und dann in die Zelle Quecksilber einfüllt, das in die Poren der Oxydschicht nicht eindringen kann, so daß die gesamte Oxydschicht als Dielektrikum zwischen dem Quecksilber einerseits und dem Ventilmetall andererseits wirkt.

Die relative Dicke der festen Oxydschicht ist sehr viel größer als die der Gasschicht und bei gegebener Formierungsspannung je nach der Stromdichte, der Temperatur und der Dauer der Formierung in weiten Grenzen veränderlich. Die relative Dicke der Gasschicht dagegen ist in wässerigen Lösungen bei jedem Ventilmetalle nur von der Spannung abhängig, bis zu welcher die Formierung durchgeführt worden ist und zwar ist sie dieser Spannung annähernd proportional.

Die nachstehende Tabelle II enthält die Kapazität eines Quadratdezimeters sowie die relative Dicke der Gasschicht der beiden wichtigsten Ventilmetalle Aluminium und Tantal bei verschiedenen Formierungsspannungen in wässerigen Lösungen. In geschmolzenen Salzen und rauchender Schwefelsäure zeigen sich andere Kapazitäten und Schichtdicken, über die sich noch keine allgemeinen Gesetzmäßigkeiten ergeben haben.

Tabelle II.
Kapazität und relative Dicke der auf den Ventilmetallen Aluminium und Tantal durch die Formierung gebildeten wirksamen Schicht.

Formierungs-spannung	Kapazität eines Quadratdezimeters wirksamer Schicht		Relative Dicke ($\varepsilon = 1$) der wirksamen Schicht	
	Aluminium	Tantal	Aluminium	Tantal
Volt	Mikroforad		Milliontel	Millimeter
50	14,5	20,6	6,11	4,30
100	6,64	10,0	13,3	8,80
150	4,25	6,50	20,8	13,6
250	2,40	3,17	36,8	27,9
500	0,81	1,47	109	60,0

Eigentümliche Erscheinungen treten auf, wenn man die Spannung an der Zelle immer weiter zu erhöhen sucht Anfänglich steigt die Spannung bei konstantem Formierungsstrome mit konstanter Geschwindigkeit an, während bald die ganze Ventilanode in gleichmäßigem bleichen nur im Dunkeln sichtbaren Lichte zu leuchten beginnt. Plötzlich beginnen bei einer ganz bestimmten, nur von der Art des Elektrolyten abhängigen Spannung, der „Funkenspannung", zahllose feine Funken die Gasschicht zu durchschlagen, während die Spannung mit verminderter Geschwindigkeit weiter steigt, bis bei einer zweiten ebenfalls scharf definierten Spannung, der „Maximalspannung", die Funken ein anderes Aussehen bekommen und das Steigen der Spannung fast vollständig aufhört. Deshalb ist die Maximalspannung wichtig, denn bei ihrer Ueberschreitung wird die Ventilzelle auf alle Fälle durchlässig.

Die Maximalspannung ist nur von der Konzentration des freien Anions des Elektrolyten und nicht von seiner Gesamtkonzentration abhängig und zwar steigt die Maximalspannung mit der Verdünnung im allgemeinen in der in Figur 20 angegebenen Weise.

Um die Maximalspannungen verschiedener Anionen miteinander vergleichen zu können, nimmt man die zu der Konzentration 0,05 normal (in bezug auf das Anion) gehörige Maximalspannung als spezifische Maximalspannung an. Diese liegt bei allen Anionen, die kein Metall enthalten, zwischen 440 und 500 Volt, während bei metallhaltigen Anionen die spezifische Maximalspannung im großen und ganzen um so niedriger liegt, je edler das Metall im Anion ist. Die niedrigste spezifische Maximalspannung ist die des Anions $PtCl_6$ im Betrage von 27 Volt. Von der Temperatur ist die Maximalspannung unabhängig.

Alle diese Erscheinungen sind jedoch nur dann störungsfrei ausgeprägt, wenn das Ventilmetall im Elektrolyten praktisch vollständig unlöslich ist (vollständige Ventilwirkung). Je größer andererseits die Löslichkeit eines Ventilmetalles in einem Elektrolyten ist, um so niedriger liegt unter sonst gleichen Umständen die Maximalspannung, um so größer bleibt der Reststrom, der nach

Digitized by Google

vollendeter Formierung noch durch die Zelle fließt, und desto eher verschwindet die Gasschicht nach dem Ausschalten des Stromes wieder (unvollständige Ventilwirkung). Da die Löslichkeit fast stets mit der Temperatur schnell zunimmt, so sind auch alle Ventilmetalle, die merkliche Löslichkeit

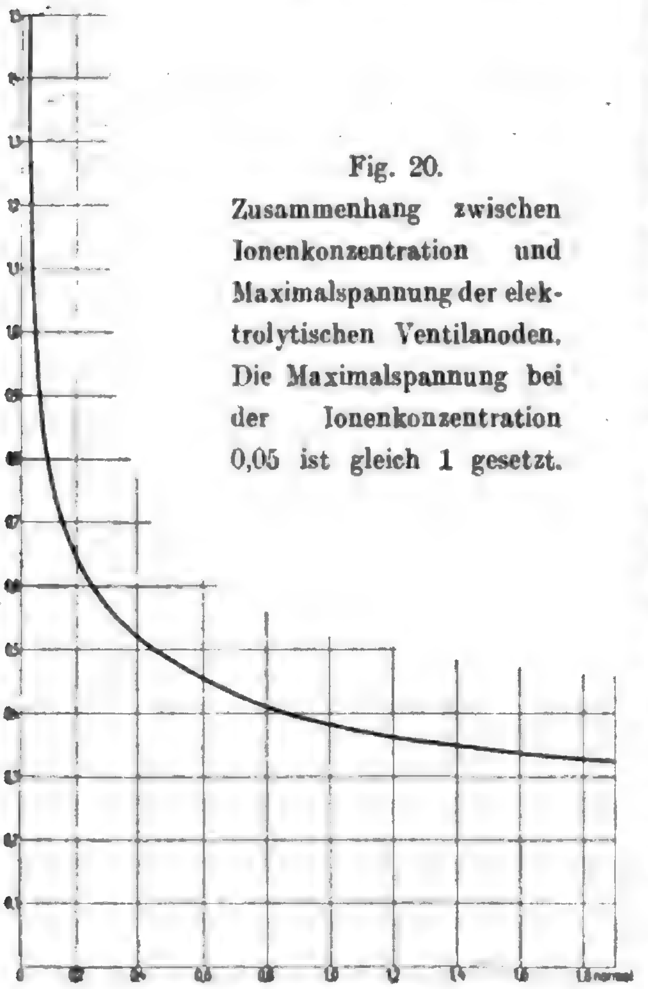


Fig. 20. Zusammenhang zwischen Ionenkonzentration und Maximalspannung der elektrolytischen Ventilanoden. Die Maximalspannung bei der Ionenkonzentration 0,05 ist gleich 1 gesetzt.

besitzen, gegen Temperatursteigerung sehr empfindlich.

Bisher ist nur die Richtung Ventilmetall-Elektrolyt, die Sperrichtung, behandelt worden. In der entgegengesetzten Richtung, der Flußrichtung, in der das Metall Kathode ist, besteht ein sehr viel geringerer Spannungsverlust, weil eben das Metall freie Elektronen viel leichter abgibt als der Elektrolyt. Nach dem Verhalten gegenüber der Flußrichtung lassen sich die Ventilmetalle scharf in zwei Gruppen trennen.

Bei der ersten Gruppe werden die auf dem Ventilmetalle durch die Formierung gebildeten Schichten vom Strom der Flußrichtung nicht verändert. Höchstens nimmt bei längerer Dauer der Flußrichtung die Dicke der Gasschicht etwas ab. Infolgedessen ist bei Wiederherstellung der Sperrichtung die Gasschicht von vornherein vorhanden und undurchlässig: Die Ventile der ersten Gruppe richten Wechselstrom bis zu den höchsten Frequenzen gleich.

Bei der zweiten Gruppe dagegen wird in der Flußrichtung die durch die Formierung entstandene Oxydschicht zu Metall reduziert und dadurch die ganze Formierung wieder vernichtet.

Die Ventile dieser zweiten Gruppe vermögen infolgedessen Wechselstrom nicht gleichzurichten, da sich die Neuformierung nicht innerhalb einer Periode vollziehen kann.

Das sind in großen Zügen die Erscheinungen an den sogenannten Elektrolyt-Ventilen, die auf der Ventilwirkung der Grenze Gas — Elektrolyt beruhen. Im einzelnen ergibt die Kombination der verschiedenen Ventilmetalle mit allen möglichen Elektrolyten eine unübersehbare Mannigfaltigkeit, aus der hier nur das Wichtigste herausgegriffen werden kann.

Wenn man berücksichtigt, daß als hinreichende Bedingung für diese Art von Ventilwirkung nur die anodische Bildung einer nichtleitenden, porösen, unlöslichen Schicht (es braucht durchaus keine Oxydschicht zu sein) unter gleichzeitiger Gasentwicklung in den Poren der Schicht nötig ist und daß es nur vom Lösungsmittel abhängt, ob eine Metallverbindung unlöslich oder löslich ist, so leuchtet ein, daß sich für fast jedes Metall ein Lösungsmittel und ein Elektrolyt finden lassen wird, in denen es Ventilwirkung zeigt. Auch die Zugehörigkeit zu einer der beiden erwähnten Gruppen kann sich für ein Metall von einem Lösungsmittel zum anderen ändern.

Bisher wurden folgende Ventilwirkungen festgestellt:

Tantal und Niob: vollständige dynamische Ventilwirkung in den wässerigen Lösungen aller Elektrolyte, in absoluter Schwefelsäure und in geschmolzenen Salzen mit Ausnahme der Halogene.

Aluminium: vollständige dynamische Ventilwirkung in den wässerigen Lösungen der komplexen Cyansalze von Zink, Nickel, Eisen, Kobalt, ferner der Arseniate, Wolframate, Molybdate sowie in rauchender Schwefelsäure. Nahezu vollständige in den wässerigen Lösungen der Borate, Citrate und sauren Karbonate, sowie in den geschmolzenen Salzen mit Ausnahme der Halogene. Unvollständige in den wässerigen Lösungen der Phosphate, Acetate und Sulfate.

Keine Ventilwirkung in den wässerigen Lösungen der Halogene, der Nitrate und der Basen (Hydroxyde). Deshalb müssen diese Stoffe sorgfältig ferngehalten werden, wenn man die Ventilwirkung des Aluminiums störungsfrei haben will.

Magnesium: unvollständige dynamische Ventilwirkung in konzentrierten Lösungen von Na_2CO_3, K_2CO_3, $Na_2HPO_4 + NH_3$, sowie in rauchender Schwefelsäure.

Digitized by Google

Wismut und Antimon: unvollständige statische Ventilwirkung (zweite Gruppe!) in den wässerigen Lösungen der meisten Elektrolyte mit Ausnahme der Nitrate, unvollständige dynamische Ventilwirkung in rauchender Schwefelsäure.

Zink und Cadmium: unvollständige statische Ventilwirkung in konzentrierteren Lösungen von K_2CO_3, dynamische in rauchender Schwefelsäure.

In der rauchenden Schwefelsäure zeigen außerdem unvollständige dynamische Ventilwirkung die Metalle: Eisen, Nickel, Kobalt, Kupfer, Zinn (Blei).

Damit ist also bereits bei 14 der häufigeren Metalle die elektrolytische Ventilwirkung festgestellt.

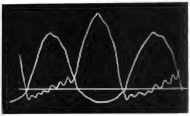
Für die praktische Verwendung als Gleichrichter kommen nur Aluminium und allenfalls Tantal in Frage. Aber auch diese besitzen als Gleichrichter so zahlreiche Mängel, daß sie sich technisch nicht einzubürgern vermocht haben. Nur im Laboratorium, wenn es sich darum handelt, ge legentlich ohne Rücksicht auf guten Nutzeffekt aus einer Wechselstromquelle Gleichstrom zu entnehmen, werden sie benutzt, weil sie billig und schnell zusammengestellt sind. Die Formierung läßt sich ebensogut mit Wechselstrom wie mit Gleichstrom ausführen.

Unter den Mängeln der Elektrolyt-Gleichrichter ist zunächst ihr geringer Nutzeffekt zu erwähnen. Er liegt darin begründet, daß auch in der Flußrichtung ein beträchtlicher Spannungsverlust vorhanden ist, der teils in der Gasschicht, teils in der vom Elektrolyten erfüllten Oxydschicht stattfindet. Da die Oxydschicht während des Betriebes dauernd dicker wird, so steigt dieser zweite Teil des Verlustes dauernd an. Die folgenden Figuren 21 und 22, die an einem einzelnen Aluminium- und einem Tantalventile aufgenommen worden sind, lassen den beträchtlichen Spannungsverlust in der Flußrichtung gut erkennen. Der in der Sperrichtung sichtbare, um eine Viertelwellenlänge gegen die Spannungskurve verschobene Strom beruht nicht auf mangelhafter Absperrung, sondern ist der Lade- und Entladestrom der in dieser Richtung wirksamen großen Kapazität der Gasschicht. Die starken Schwankungen oder Oberschwingungen dieses Stromes sind in der benutzten Wechselstromquelle vorhanden. Sie treten bei dem Kapazitätsstrome so stark hervor, weil Kapazitäten die Eigenschaft haben, Oberschwingungen zu verstärken.

Ein weiterer Mangel der Elektrolyt-Gleichrichter ist die im Betriebe auftretende, dem gleichgerichteten Strome proportionale Knallgasentwickelung, die einen beträchtlichen Verbrauch an Wasser zur Folge hat, so daß die Ventile häufig nachgefüllt werden müssen.

Schlechthin unmöglich aber wird die technische Verwendung der elektrolytischen Ventile zum Gleichrichten durch den Umstand, daß sie stets nach kurzer Zeit unbrauchbar werden. Die zunehmenden Verluste bewirken eine zunehmende auf die Oxydschicht konzentrierte Erhitzung, die auf die Dauer stets die Oxydschicht löst und zerstört. Da die Zerstörung eine Verminderung des Widerstandes zur Folge hat, so konzentriert

I



II

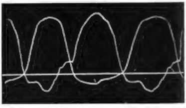


Fig. 21. Ventilwirkung von Aluminium in wässeriger Lösung von Ammoniumborat. I Wechselspannung 90 Volt effektiv, II Wechselspannung 300 Volt effektiv. Ventil infolge von Ueberschreitung der Maximalspannung in der Sperrichtung teilweise durchlässig.

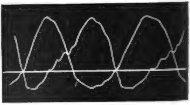


Fig. 22. Ventilwirkung von Tantal in wässeriger Lösung von K_2CO_3. Wechselspannung 80 Volt effektiv.

Digitized by Google

sie sich bald auf einen Punkt, an dem dann schorfartige Anfressungen entstehen, die schließlich die Ventilwirkung vollständig vernichten. Peinlichste Reinheit aller benutzten Stoffe, insbesondere Verwendung absolut halogen- und nitratfreier Elektrolyte sowie möglichst energische Kühlung des Ventilmetalles vermögen die Zerstörung zu verzögern. Die Stromdichte in der Flußrichtung soll 1 bis 2 Ampere pro Quadratdezimeter nicht überschreiten. Die Spannungsgrenze liegt zwischen 100 und 200 Volt Wechselspannung. Zum Gleichrichten höherer Spannungen sind stark verdünnte und infolgedessen schlechtleitende Elektrolyte erforderlich, in denen die Spannungsverluste zu groß werden. Die geeignetsten Elektrolyte für Aluminium sind neutrale oder schwach saure Boratlösungen oder Zitronensäure. Auch saure Karbonate werden gelegentlich benutzt. Für Tantal sind die meisten Sauerstoffsalze brauchbar, Halogene aber auch durchaus zu vermeiden.

Viel haltbarer und weniger gefährdet sind die elektrolytischen Ventile bei statischer Verwendung. Beispielsweise werden sie im Eisenbahnbetriebe benutzt, um zu verhindern, daß die von einer Lokomotivdynamo geladene Beleuchtungsbatterie sich rückwärts durch die Dynamo entlädt, wenn die Lokomotive nicht in Fahrt ist.

4. Ventile, deren Wirkungsweise noch nicht sicher erklärt ist. Detektoren. Damit sind die auf den verschiedenen Grenzen beruhenden Ventile erschöpft und es bleibt noch die Besprechung der Ventile übrig, bei denen die Ursachen ihrer Ventilwirkung noch unbekannt oder strittig sind. Es sind das im wesentlichen die Detektoren der Funkentelegraphie. Bei vielen von ihnen ist es zweifelhaft, ob sie überhaupt noch zu den Ventilen oder nicht vielmehr zu den relaisartigen Auslösevorrichtungen zu rechnen sind, die durch Hochfrequenzströme in einen Zustand versetzt werden, in dem sie für den von einer Batterie gelieferten Gleichstrom leichter durchlässig sind als zuvor.

Für diese Detektoren wurde von Brandes eine rein formale, übrigens auf alle Ventile anwendbare Theorie aufgestellt. Brandes weist zunächst darauf hin, daß alle diese Gleichrichter-Detektoren dadurch charakterisiert sind, daß sie sehr ungleich große Elektroden besitzen, wie z. B. eine Spitze, die auf einer Platte ruht. Gibt man ihnen symmetrische Elektroden, so zeigen sie keine Ventilwirkung.

Wenn die Art der elektrischen Strömung in den beiden Elektroden verschieden ist, oder die positiven Ionen in ihnen eine andere Beweglichkeit haben als die negativen, so bewirkt die Unsymmetrie der Elektroden, daß die mit Gleichstrom aufgenommene Beziehung zwischen Strom und Spannung des Ventiles für die beiden entgegengesetzten Stromrichtungen nicht gleich ist. Vielmehr erhält man schematisch die umstehende Figur 23.

Aus dieser Figur läßt sich nun folgendes direkt ersehen:

1. Belastet man das Ventil mit einer reinen Wechselspannung, die zwischen $+e_1$ und $-e_1$ verläuft, so ist der zu $+e_1$ gehörige Strom $+i_1$ größer als der zu $-e_1$ gehörige Strom $-i_1$, das heißt, es entsteht ein Gleichstrom im positiven Sinne.

2. Belastet man das Ventil mit konstantem Gleichstrom ig_1 und lagert über diesen die Wechselspannung $\pm e_1$, so sind die durch diese Wechselspannung bedingten Stromänderungen $\pm i_1$ einander gleich. Eine Veränderung des Gleichstromes ig_1 oder eine Ventilwirkung auf den Wechselstrom findet nicht statt.

3. Belastet man das Ventil mit dem größeren Gleichstrom ig_2 und der übergelagerten Wechselspannung $\pm e_1$, so ist der von ihr bedingte Strom $-i_1$ größer als der Strom $+i_1$. Es resultiert also eine Schwächung des Stromes ig_2 oder es findet eine Gleichrichtung des Wechselstromes im negativen Sinne statt.

Das heißt durch zunehmende Belastung des Ventiles mit Gleichstrom läßt sich die ursprüngliche Ventilwirkung schwächen, vernichten und in ihr Gegenteil umkehren. Die Gleichrichterwirkung wird um so kräftiger, je stärker die Krümmung der Charakteristik an der dem eingestellten Gleichstrom entsprechenden Stelle ist. Das leuchtet ein. Hat man die größtmögliche Krümmung wie in Figur 24, so hat man eben das ideale verlustlose Ventil mit dem Widerstande unendlich in der Sperrichtung und dem Widerstande Null in der Flußrichtung.

Das aus der Charakteristik abgeleitete Verhalten zeigen nun in der Tat die Kristalldetektoren, die man erhält, wenn man eine Spitze irgendeines Metalls auf einem Kristall eines geeigneten Minerals oder umgekehrt unter mäßigen Druck aufliegen läßt. Die richtige Einstellung des Auflagedruckes ist dabei sehr wichtig. Bei Erhöhung des Druckes über eine bestimmte Grenze verschwindet die Ventilwirkung vollständig.

Besonders gut sollen folgende Kombinationen sein: 1. Tellur-Silicium; 2. Stahl-Silicium; 3. Stahl-Kohle; 4. Tellur-Aluminium; 5. Metall-Carborundum; 6. Zinkit-Chalkopyrit.

Die folgende von Leimbach ermittelte Tabelle III möge zur Kennzeichnung des Verhaltens dieser Detektoren dienen.

Sie bezieht sich auf die Kombination Tellur-Silicium.

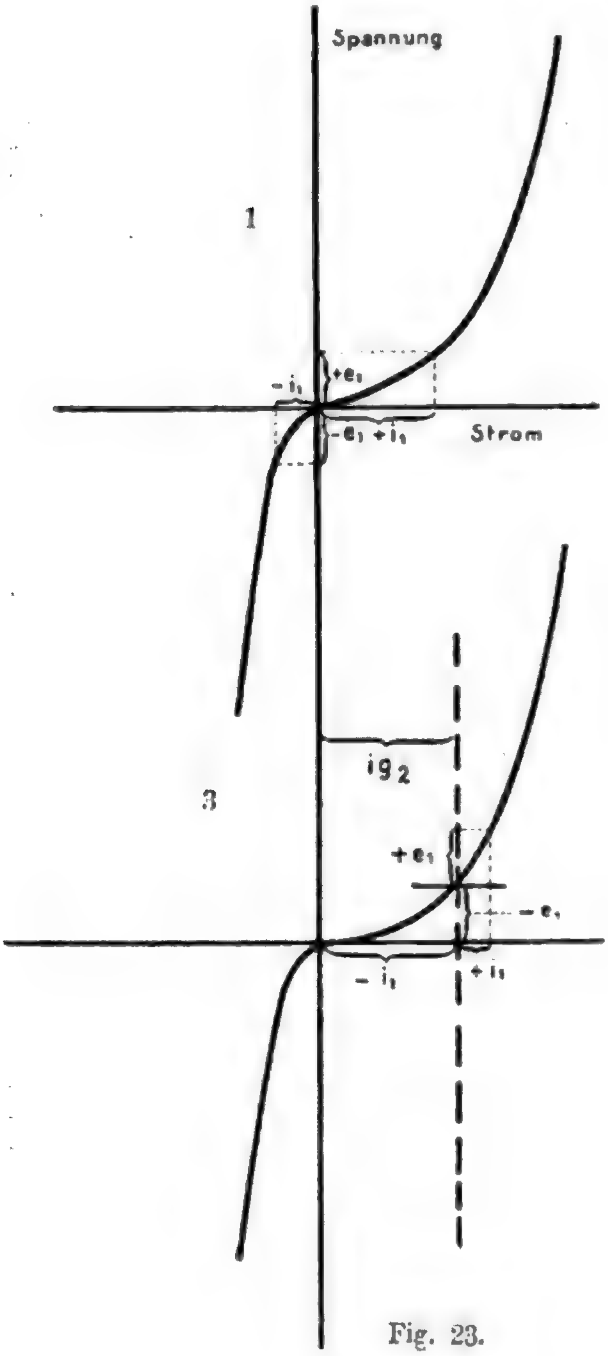
Digitized by Google

Tabelle III.

Hilfs-spannung Volt	Gleichstrom i_g Amp.	Durch die Hochfrequenzschwingungen ausgelöster Gleichstrom Amp.
0	0	— 80 . 10^{-8}
0,082	1 . 10^{-8}	— 78 „
0,615	5,8. „	— 39 „
0,820	10,5. „	+ 2 „
1,050	17,0. „	+ 135 „
2,10	84,0. „	+ 5 040 „
2,94	864,0. „	+18 240 „

Die Tabelle zeigt deutlich die Umkehrung des Sinnes der Gleichrichtung bei zunehmendem Hilfsstrome. Ferner zeigt sie, daß es sich hier um sehr geringe Ströme handelt. Deshalb ist bisher noch keine technische Anwendung dieser Detektoren zum Gleichrichten größerer Ströme versucht worden. Auch würde ihr Wirkungsgrad dafür kaum genügen.

Außer den Kristalldetektoren sind hier noch die Elektrolytdetektoren zu erwähnen, deren wichtigster die Schlömilchzelle ist. W. Schlömilch, nach dem die Zelle genannt ist, fand folgendes: Wenn man eine gewöhnliche Polarisationszelle mit Elektroden aus Platin oder Gold in verdünnter Säure an eine Stromquelle anschließt, deren elektromotorische Kraft um einen geringen Betrag höher ist als die Gegenkraft der Zelle, so daß durch die Zelle ein dauernder Zersetzungsstrom



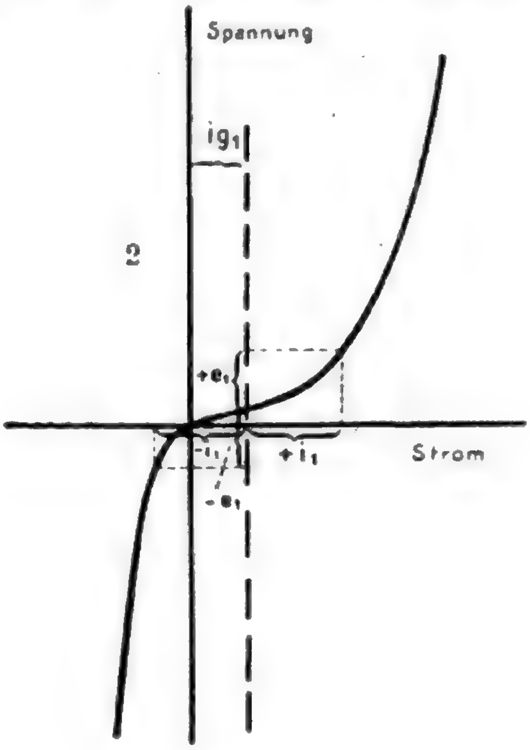


Fig. 23.

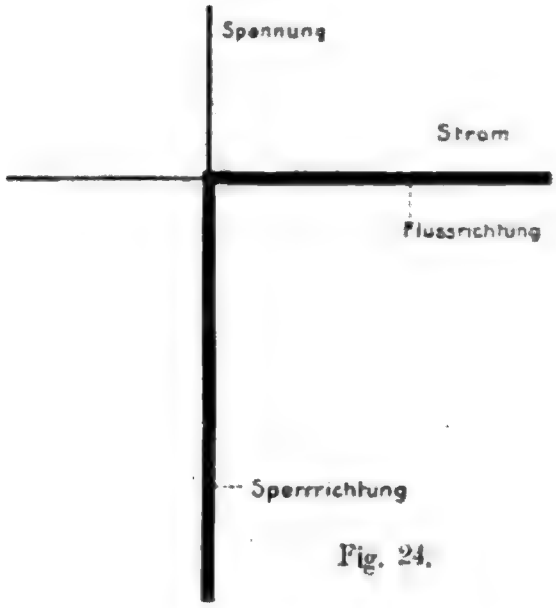


Fig. 24.

Digitized by Google

fließt und sich eine zarte Gasentwicklung an den Elektroden einstellt, so zeigt ein in den Stromkreis eingeschalteter Stromanzeiger eine Verstärkung des Gleichstromes an, sobald die Zelle mit elektrischen Wellen bestrahlt wird. Die Ergebnisse werden sehr günstig, wenn die Anode eine mikroskopisch kleine Oberfläche erhält, z. B. einen Durchmesser von 0,001 mm und eine Länge von 0,01 mm. Macht man die Anode zur Kathode, so verschwindet die Wirkung vollständig. Die Maximalempfindlichkeit ist nur bei einer ganz bestimmten Stärke der Gasentwicklung vorhanden. Jede Zelle hat deshalb eine kritische Hilfsspannung, auf die sie eingestellt werden muß.

Offenbar handelt es sich bei der Schlömilchzelle nicht um eine eigentliche Gleichrichtung, sondern um einen Auslösevorgang, denn es kommt gar nicht zur Umkehrung der Stromrichtung und zur Ausnutzung der durch die verschiedenen Elektrodengrößen bedingten Unipolarität. Von den Erklärungen der Wirkungsweise der Schlömilchzelle scheint die von Nernst angegebene als die wahrscheinlichste. Die Unipolarität wird nach Nernst dadurch verursacht, daß die Umgebung der kleinen Anode sehr schnell an Sauerstoffionen verarmt. Die Spannung muß in die Höhe gehen, bis OH-Ionen entladen werden, ja auch diese werden verarmen und vollständige Gasentwickelung kann erst eintreten, wenn das Potential so hoch geworden ist, daß SO_4-Ionen entladen werden.

Die Verstärkung des Gleichstromes der Schlömilchzelle durch elektrische Wellen erklärt Nernst durch die Annahme, daß die durch die Polarisation an der kleinen Anode gebildeten, aus Gas bestehenden Uebergangsschichten von den elektrischen Wellen durchschlagen werden. Nach dem Durchschlagen wird der frühere Zustand in einer Zeit wiederhergestellt, die gegenüber dem Zwischenraume zwischen zwei Wellenzügen kurz ist.

Literatur. *Zusammenfassende Arbeiten existieren nicht. Einige wichtigere Arbeiten über Einzelgebiete:* **J. Elster und H. Geitel,** *Weitere Untersuchungen an photoelektrischen Zellen mit gefärbten Kaliumkathoden. Phys. Zeitschr. S. 609. 1911.* — **A. Wehnelt,** *Ein elektrisches Ventilrohr. Ann. Phys. 19, S. 138. 1905.* — **J. A. Fleming,** *On the conversion of electric Oscillations into continous currents by means of a Vacuum Valve. Proc. Roy. Soc. 74, S. 476. 1905.* — **H. Starke,** *Ueber die unipolare Leitung in Gasen. Verhandl. d. Deutsch. phys. Ges. S. 377. 1903.* — **G. Schulze,** *Versuche an Quecksilbergleichrichtern. Elektrot. Zeitschr. S. 295. 1909.* — **Derselbe,** *Betrag und Kurvenform des Rückstromes im Quecksilbergleichrichter. Elektrot. Zeitschr. S. 28. 1910.* — **Béla B. Schäfer,** *Ein neuer Quecksilberdampfgleichrichter für große Leistungen. Elektrot. Zeitschr. S. 2. 1911.* — **G. Schulze,** *Ueber die elektrolytische Gleichrichtung von Wechselstrom. Zeitschr. f. Elektrochem. 25, S. 333. 1908.* — **Derselbe,** *Der Einfluß der Elektrolyte auf die Maximalspannung der elektrolytischen Ventilwirkung. Ann. Phys. 4, 34, S. 657. 1911.* — **H. Brandes,** *Ueber Abweichungen vom ohmschen Gesetz, Gleichrichterwirkung und Wellenanzeiger der drahtlosen Telegraphie. Elektrot. Zeitschr. S. 1015. 1906.* — **G. Leimbach,** *Leitvermögen von Kontaktdetektoren und ihre Gleichrichterwirkung. Phys. Zeitschr. S. 229. 1911.* — **W. Schlömilch,** *Ein neuer Wellendetektor für drahtlose Telegraphie. Elektrot. Zeitschr. S. 959. 1903.*

G. Schulze.

Elektrischer Widerstand.

I. Widerstand als Abstraktum (= Resistanz). 1. Definition und Einheit. 2. Abhängigkeit von Material, physikalischem Zustand und Form des Leiters. a) Abhängigkeit vom Material. 1. Metalle. 2. Elektrolyte. 3. Dielektrika. 4. Leitende Gase. b) Abhängigkeit von der Temperatur. c) Abhängigkeit vom Strom. d) Abhängigkeit von der Magnetisierung. e) Abhängigkeit von der Belichtung. f) Abhängigkeit von der Form. 3. Meßmethoden. a) Beschreibung der einzelnen Methoden. 1. Strom- und Spannungsmessung. 2. Strom- und Leistungsmessung. 3. Substitutionsmethode. 4. Wheatstone-Kirchhoffsche Brücke. 4a. Thomsonsche Doppelbrücke. 5. Differentialgalvanometer. 6. Siemenssche Methode. 7. Direkt zeigende Widerstandsmesser. 8. Elektrolytische Widerstände. 9. Absolute Methoden. b) Anwendungsgebiet und Leistungsfähigkeit der gebräuchlichen Meßmethoden. 4. Anwendungen. a) Schwächung und Regulierung des Stromes oder der Spannung. 1. Durch Vorschaltwiderstand. 2. Durch Abzweigung. b) Energieverlust und Spannungsabfall. 1. Bei der Erzeugung der Energie. 2. Bei der Fortleitung der Energie. 3. Bei den Umsetzungen der Energie. c) Erzeugung von Wärme durch den elektrischen Strom. 1. Zum Heizen. 2. Bei den Glühlampen. 3. Bei Messungen. α) Zu thermischen Messungen. β) Zur Strommessung. $\alpha\alpha$) Hitzdrahtinstrumente. $\beta\beta$) Luftthermometer. $\gamma\gamma$) Thermoelemente und Thermogalvanometer. $\delta\delta$) Barretter. $\varepsilon\varepsilon$) Relais und Sicherungen. d) Messung und Nachweis anderweitiger physikalischer Vorgänge durch Messung der durch sie bewirkten Widerstandsänderung. 1. Widerstandsthermometer. 2. Bolometer und Barretter. 3. Selenzellen. 4. Wismutspirale. 5. Mikrophon. II. Widerstand als Konkretum (= Rheostat). 1. Meßwiderstände. a) Anforderungen. b) Material. c) Ausführungsformen. 1. Widerstandskörper. α) Präzisionswiderstände. β) Induktions- und Kapazitätsfreie Widerstände. 2. Zuleitungen und Schaltvorrichtungen. α) Einzelwiderstände. β) Widerstandssätze. d) Belastbarkeit. 2. Regulier- und Belastungswiderstände (Ballastwiderstände). a) Anforderungen. b) Material. c) Belastbarkeit. d) Ausführungsformen. 1. Einzel-

Digitized by Google

widerstände. 2. Regulierbare Widerstände. α) Kurbelwiderstände. β) Schieberwiderstände. γ) Flüssigkeitswiderstände. 3. Heizwiderstände.

Der Ausdruck „elektrischer Widerstand" wird in zwei verschiedenen Bedeutungen gebraucht: einmal als Abstraktum; man bezeichnet dann damit eine Eigenschaft eines Leiters; dann auch als Konkretum, als Bezeichnung des mit dieser Eigenschaft behafteten Leiters selbst. Zur Unterscheidung dieser beiden Bedeutungen spricht man im ersten Falle wohl auch von „Resistanz", im zweiten von einem „Rheostaten".

I. Widerstand als Abstraktum (= Resistanz).

1. Definition und Einheit. Fließt durch einen irgendwie gestalteten Leiter ein elektrischer Strom J, so tritt zwischen der Einführungs- und der Ausführungsstelle des Stromes (den Klemmen des Leiters) eine Potentialdifferenz E auf. Die Erfahrung hat gezeigt, daß bei gleichen äußeren Umständen, insbesondere bei gleicher Temperatur des Leiters, diese Potentialdifferenz E proportional dem Strome J ist:

$$E = J.W \qquad (1)$$

(Ohmsches Gesetz, vgl. den Artikel „Elektrizitätsleitung").

Der Proportionalitätsfaktor W heißt der elektrische Widerstand des Leiters. Die Bezeichnung „Widerstand" stammt ebenso wie der Ausdruck „Strom" aus der hydrodynamischen Analogie: Fließt durch ein enges Rohr pro sec die Flüssigkeitsmenge J, so beobachtet man zwischen Eintritts- und Austrittsstelle eine Druckdifferenz E, die proportional J ist:

$$E = JW \qquad (1a)$$

Der Proportionalitätsfaktor W gibt hier ein Maß für den Widerstand, den die Reibung im Rohre der Flüssigkeitsbewegung entgegensetzt.

Nach dieser Definition ist also der elektrische Widerstand eines Leiters gleich dem Quotienten aus seiner Klemmenspannung E dividiert durch den ihn durchfließenden Strom J.

Im Einklange hiermit stehen folgende Definitionen:

Ein einen Leiter durchfließender Strom erzeugt in ihm in der Zeiteinheit eine Wärmemenge, die proportional dem Quadrate des Stromes ist:

$$Q = J^2 W \qquad (2)$$

(Joulesches Gesetz)

oder mit Rücksicht auf (1):

$$Q = E^2/W \qquad (3)$$

Die Proportionalitätsfaktoren W sind wieder gleich dem elektrischen Widerstande des Leiters, falls die Wärmemenge im Energiemaß (erg) gemessen wird. Daß diese beiden Definitionen (2) und (3) im Einklange sind mit (1), folgt aus dem Energieprinzip, denn die erzeugte Wärmemenge muß gleich der in der Zeiteinheit geleisteten elektrischen Arbeit sein:

$$Q = E.J$$ [1])

Die Einheit des elektrischen Widerstandes ergibt sich demnach aus den Einheiten für Strom und Spannung: die Einheit des Widerstandes besitzt ein Leiter, in dem der Strom 1 die Potentialdifferenz 1 erzeugt. Die Dimension des elektrischen Widerstandes ist also

$$[W] = \frac{[E]}{[J]};$$

oder im elektromagnetischen Maßsystem:

$$[W]_m = \frac{[l]^{\frac{3}{2}}[m]^{\frac{1}{2}}[t]^{-2}}{[l]^{\frac{1}{2}}[m]^{\frac{1}{2}}[t]^{-1}} = \frac{[l]}{[t]}; \qquad (4)$$

im elektrostatischen Maßsystem:

$$[W]_s = \frac{[l]^{\frac{1}{2}}[m]^{\frac{1}{2}}[t]^{-1}}{[l]^{\frac{3}{2}}[m]^{\frac{1}{2}}[t]^{-2}} = \frac{[t]}{[l]} \qquad (5)$$

Praktisch kommt nur das elektromagnetische Maßsystem in Betracht, die absolute elektromagnetische Einheit ist 1 cm/sec (Dimension der Geschwindigkeit)[2]); die praktische Einheit ist das 10^9fache hiervon und heißt ein Ohm (Ω oder [illegible]):

$$1\,\Omega = 10^9\ \text{C.G.S.} = 10^9\,\frac{\text{cm}}{\text{sec}}$$

$$1\ \text{C.G.S.} = 10^{-9}\,\Omega$$

$$10^6\,\Omega = 1\ \text{Megohm}.$$

Die elektrostatische Einheit des e. W. hat die Dimension einer reziproken Geschwindigkeit; das Verhältnis beider Einheiten ist gleich dem Quadrate der Lichtgeschwindigkeit c:

$$\frac{\text{1 elektrostat. Einheit}}{\text{1 elektromagn. Einheit}} = c^2 = 9.10^{20}\,\frac{\text{cm}^2}{\text{sec}^2};$$

also:

$$\text{1 elektrostat. Einheit} = 9.10^{20}.10^{-9}\,\Omega$$

$$1\ \text{C.G.S.st.} = 9.10^{11}\,\Omega$$

$$1\,\Omega = \frac{1}{9}\,10^{-11}\ \text{C.G.S.st.}$$

Die gesetzliche Einheit des Wider-

---

[1]) Von diesen Definitionen ist die universellste die zweite; denn während die Gesetze (1) und (3) im allgemeinen nur bei konstantem Strom gelten, bleibt (2) auch bei beliebig schnell veränderlichen Strömen gültig.

[2]) Der Widerstand läßt sich auch als Geschwindigkeit darstellen, z. B. ist er gleich der Geschwindigkeit, mit der ein Leiter von 1 cm Länge im Magnetfelde 1 bewegt werden muß, damit in ihm der Strom 1 entsteht.

Digitized by Google

standes (vgl. den Artikel „Elektrische Maßnormale“) ist ebenfalls das Ohm; sie ist aber wegen der Schwierigkeit der Messung nicht nach dem absoluten Maßsystem definiert, sondern als Widerstand eines leicht reproduzierbaren Leiters:

Das gesetzliche „internationale Ohm“ ist gleich dem Widerstande einer Quecksilbersäule von 1063 mm Länge und 1 mm² Querschnitt bei 0° C. Diese Säule wiegt 14,4521 g. Diese Einheit ist gewählt auf Grund der absoluten Messungen von Kohlrausch, Dorn, Rowland, Rayleigh u. a.; sie stimmt innerhalb der Genauigkeit dieser Messungen (0,03%) mit der absoluten C.G.S.-Einheit überein.

Andere (veraltete) Widerstandseinheiten:

Siemenseinheit (S.E.): Widerstand einer Quecksilbersäule von 1 mm² Querschnitt und 1000 mm Länge:

$$1\,\Omega = 1{,}063 \text{ S.E.}$$
$$1 \text{ S.E.} = 0{,}9407\,\Omega$$

British Association Unit. (B.A.U.):

$$1 \text{ B.A.U.} = 0{,}9866\,\Omega$$
$$1\,\Omega = 1{,}013 \text{ B.A.U.}$$

Legales Ohm (Ω leg.):

Widerstand einer Quecksilbersäule von 1060 mm Länge und 1 mm² Querschnitt bei 0°:

$$1\,\Omega \text{ leg.} = 0{,}9972\,\Omega$$
$$1\,\Omega = 1{,}0028\,\Omega \text{ leg.}$$

Der reziproke Wert des Widerstandes heißt die „Leitfähigkeit“ des Leiters; die praktische Einheit der Leitfähigkeit ist das reziproke Ohm (Ω^{-1} oder auch „Mho“ geschrieben).

2. Abhängigkeit des Widerstandes von Material, physikalischem Zustand und Form des Leiters. Bei linearen Leitern, d. h. Drähten konstanten Querschnittes, deren Länge l groß gegen den Querschnitt q ist, hat die Erfahrung gezeigt, daß der Widerstand W proportional l und umgekehrt proportional q ist:

$$W = \frac{l}{q} \cdot \sigma \qquad (6)$$

Der Proportionalitätsfaktor σ heißt spezifischer Widerstand; er ist nur von Material und physikalischem Zustande des Leiters abhängig. Er ist nach Gl. (6) definiert als der Widerstand eines Leiters von der Länge 1 und dem Querschnitt 1, d. h. eines Würfels von 1 cm Seitenlänge, in dem der Strom parallel einer Kante fließt. Er hat die Dimension:

$$[\sigma]_s = [W] \cdot [l] = \frac{[l^2]}{[t]}; \qquad (7)$$

seine Einheit ist das Ω cm. Der reziproke Wert des spezifischen Widerstandes heißt das „Leitvermögen“ ($\varkappa$) der betr. Substanz:

$$\varkappa = \frac{1}{\sigma}$$

2a) Abhängigkeit des spezifischen Widerstandes vom Material. 1. Metalle. Bei Metallen hat mit wenigen Ausnahmen (Bi, Sb, Hg) σ die Größenordnung 10^{-6} bis 10^{-5} Ω cm. Man gibt deshalb bei Metallen gewöhnlich den 10^{-4}fachen Betrag von σ, d. h. den Widerstand eines Drahtes von 1 m Länge und 1 mm² Querschnitt an, vgl. Tabelle I. Zusätze, auch schon geringe Verunreinigungen, vergrößern σ beträchtlich. Außerdem ändert sich σ mit der Struktur des Metalls, vor allem mit der Härte: Hämmern, Ziehen, Walzen, Aufwickeln, was die Härte vergrößert, vergrößert im allgemeinen auch den Widerstand, während Ausglühen den Widerstand verringert. Bei Legierungen ist σ vielfach größer als bei jeder der Komponenten. Aehnlich wie metallische Leiter verhält sich Gasretortenkohle, nur ist hier σ etwa 1000 mal größer.

2. Elektrolyte (Leiter II. Klasse). Bei elektrolytischen Leitern, d. h. solchen Leitern, die durch den Strom zersetzt werden (hauptsächlich wässerige Lösungen), wird gewöhnlich das Leitvermögen $\varkappa$ angegeben. Bei stark verdünnten wässerigen Lösungen (im allgemeinen unter $^1/_{100}$ normal) ist das Leitvermögen proportional der Konzentration; bezogen auf gleichen Aequivalentgehalt hat es für alle Lösungen annähernd den gleichen Betrag, es ist nämlich ungefähr

$$\varkappa = 0{,}1\,\Omega^{-1}\,\text{cm}^{-1}$$

für $^1/_1$ normale Lösungen. Bei größerer Konzentration wächst $\varkappa$ langsamer als die Konzentration und erreicht bei manchen Elektrolyten ein Maximum (z. B. Schwefelsäure, Zinksulfat).

3. Dielektrika. Als Dielektrika oder Isolatoren bezeichnet man im allgemeinen Stoffe, für die

$$\sigma > 10^{12}\,\Omega\,\text{cm} = 10^{6}\,\text{Megohm.cm}$$

ist; hierher gehören Bernstein, Hartgummi (Ebonit), Glas, Glimmer, Holzkohle, Paraffin, Siegellack, Guttapercha, Oel. Jedoch ist der Begriff „Isolator“ kein feststehender; z. B. pflegt man in der Technik auch Stoffe mit einem spezifischen Widerstand $\sigma > 10^{6}\,\Omega$cm (trockenes Holz, Schiefer, Marmor, Vulkanfibre) als Isolatoren zu bezeichnen.

Stoffe, deren spezifischer Widerstand zwischen dem der Leiter und der Isolatoren liegt, nennt man Halbleiter (Holz, Papier, Stroh, reines Wasser, Alkohol).

4. Gasstrecken. Endlich spricht man von Widerstand auch bei solchen Leitern, bei denen das Ohmsche Gesetz nicht gilt, nämlich bei leitenden Gasstrecken (Lichtbogen, Funken, Geißlerröhren). Hier hat der Begriff Widerstand rein formale Bedeutung. Er ist entweder nach Gl. (1) definiert als Quotient von Spannung und Stromstärke, oder auch

Digitized by Google

als Quotient von Spannungsänderung und zugehöriger Stromänderung:

$$W = \frac{dE}{dJ}$$

(„Widerstand gegen Aenderungen“). Letztere Definition ist namentlich in der Theorie der ungedämpften elektrischen Schwingungen von Nutzen; der so definierte Widerstand kann auch (bei Leitern mit „fallender Charakteristik“) **negative** Beträge annehmen.

2b) **Abhängigkeit des spezifischen Widerstandes von der Temperatur.** Die Abhängigkeit des spezifischen Widerstandes von der Temperatur wird bei kleineren Temperaturintervallen (bis ca. 100°) hinreichend genau dargestellt durch die Formel:

$$W_T = W_0(1 + \alpha[T - T_0]) \quad (8)$$

worin W_0 und W_T die spezifischen Widerstände bei den Temperaturen T_0 bezw. T bezeichnen. Als T_0 wird meistens die Zimmertemperatur (18° C) gewählt. Die Konstante α heißt der **Temperaturkoeffizient** des Widerstandes.

Bei reinen festen Metallen ist α positiv und hat ungefähr den Betrag 0,004 (gleich dem Ausdehnungskoeffizienten der Gase). Zusätze fremder Metalle **verkleinern** α; bei Legierungen kann α sehr klein, unter Umständen negativ werden. Bei reinen, **flüssigen** Metallen (Quecksilber, geschmolzenem Zinn, Blei usw.) ist der Temperaturkoeffizient wesentlich kleiner, im Mittel etwa $^1/_{10}$ von dem der festen Metalle; bei Quecksilber beträgt er 0,00092. Beim Schmelzpunkt ändert sich nicht nur der Temperaturkoeffizient, sondern auch der spezifische Widerstand **sprungweise**, ebenso hat man bei Umwandlungspunkten (Eisen) eine sprunghafte Aenderung des Temperaturkoeffizienten beobachtet. Bei **Leitern zweiter Klasse** (Elektrolyten) und außerdem bei Kohle ist α **negativ**; bei wässerigen Lösungen ist er ungefähr gleich — 0,02, also wesentlich größer als bei Metallen. Bei **Isolatoren** ist α ebenfalls negativ und erreicht unter Umständen sehr hohe Beträge; z. B. sinkt bei imprägniertem Papier, wie es zur Kabelisolation verwandt wird, der Widerstand beim Erhitzen von 0° auf 80° auf etwa den hundertsten Teil.

Die folgenden Tabellen I und II geben für die wichtigsten Stoffe spezifischen Widerstand und Temperaturkoeffizienten an.

Bei größeren Temperaturintervallen versagt Formel (8); man kann das auch so ausdrücken: α hängt von der Temperatur ab, und zwar nimmt bei reinen, festen Metallen α mit zunehmender Temperatur ab. Bis etwa 900° C läßt sich der Widerstand mit großer Annäherung für die meisten Metalle darstellen durch die Formel

Tabelle I (nach Kohlrausch).
Spezifischer Widerstand von Leitern bei 18°.

	$10^4 . \sigma$	$10^3 \alpha$
Silber	0,016	+4,0
Kupfer	0,017	+4,0
Gold	0,023	+4,0
Aluminium	0,032	+3,6
Iridium	0,053	+4,1
Rhodium	0,060	+4,4
Zink	0,061	+3,7
Cadmium	0,076	+4,0
Palladium	0,107	+3,8
Platin, rein	0,108	+3,9
„ käufl.	0,14	2 bis 3
Nickel	0,08 bis 0,11	bis 6
Eisen	0,09 bis 0,15	bis 6
Stahl	0,15 bis 0,5	—
Blei	0,21	+4
Antimon	0,45	+4,1
Tantal	0,16	+3
Wismut	1,2	+4,2
Quecksilber	0,958	+0,92
Konstantan	0,49	—0,03 bis +0,05
Manganin	0,42	bis +0,03
Neusilber	0,16 bis 0,40	+0,6 bis +0,23
Nickelin	0,42	+0,23
Patentnickel	0,33	+0,2
20 Pt, 80 Ag	0,20	+0,33
10 Rh, 90 Pt	0,20	+1,7
Messing	0,07 bis 0,09	—
Gaskohle	etwa 50	—0,02 bis —0,8
Bestleitende Schwefelsäure (30%)	σ = 1,35	—16
do. Zinksulfatlösung (23,5%)	σ = 20,8	—26

Tabelle II (nach Uppenborn).
Spezifischer Widerstand von Isolatoren bei Zimmertemperatur in Megohm . cm (nur Größenordnung).

	$\sigma . 10^{-6}$
Hartgummi	10^9—10^{10}
Paraffin	10^9
Guttapercha	10^8—10^9
Fensterglas	10^7
Glimmer	10^6
Holzkohle	10^5—10^6
Preßspahn	10^4
Marmor	ca. 500
Vulkanfibre	ca. 50
Schiefer	1—10
Paraffinöl	10^7
Benzin	10^7
Benzol	10^8

$$W_T = W_0(1 + \alpha[T - T_0] - b[T - T_0]^2). \quad (9)$$

Für reines Platin ist z. B.

$$b = 0,00015\,\alpha$$

Bei sehr tiefen Temperaturen nimmt α stark zu; neuere Messungen machen es wahr-

Digitized by Google

scheinlich, daß noch oberhalb des absoluten Nullpunktes (— 273°) der Widerstand 0 wird, das Leitvermögen also über alle Grenzen wächst.

2c) Abhängigkeit vom Strom. Eine Abhängigkeit des Widerstandes W vom Strome J ist im allgemeinen nicht vorhanden, d. h. in dem Ohmschen Gesetz (Gl. 1) ist W eine wirkliche Konstante. Es tritt aber wohl häufig eine indirekte Abhängigkeit des Widerstandes vom Strom auf, weil der Strom jeden von ihm durchflossenen Leiter erwärmt und dadurch seinen Widerstand ändert. In solchen Fällen ist es zweckmäßig, die Abhängigkeit des Widerstandes vom Strom graphisch darzustellen, indem man die Kurve zeichnet, welche die Klemmenspannung des Leiters als Funktion des Stromes darstellt (Charakteristik). Ist der Widerstand des Leiters unabhängig vom Strom (Temperaturkoeffizient $\alpha = 0$), so ist die Charakteristik eine durch den Ursprung gehende Gerade, bei negativem α ist sie eine nach unten konkave, bei positivem α eine nach unten konvexe Kurve.

Als Bespiel ist in Figur 1 die Charakteristik einer Metallfadenglühlampe (Kurve I) und einer Kohlenfadenglühlampe (Kurve II) gezeichnet. Die Steilheit der Charakteristik I hat zur Folge,

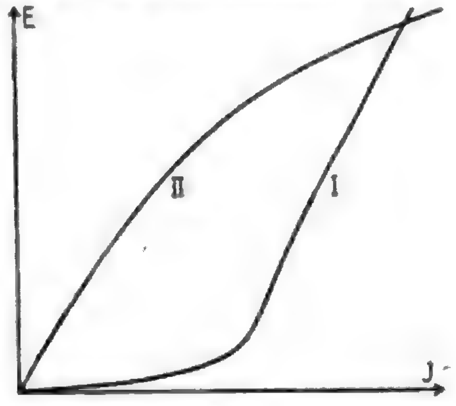


Fig. 1.

daß bei einer Veränderung der Netzspannung E der Strom J sich nur wenig ändert, so daß die Aenderung der der Lampe zugeführten Energie E.J etwa proportional der Spannungsänderung ist; bei der Kohlenfadenlampe erzeugt hingegen dieselbe Spannungsänderung eine prozentual 2 bis 3mal so große Stromänderung, also eine etwa 3 bis 4mal so große Aenderung der Leistung; da die Temperatur des Glühfadens und damit seine Lichtstärke nur von der zugeführten Leistung abhängen, folgt, daß bei einer Schwankung der Netzspannung die Helligkeit der Kohlenfadenlampe stärker schwanken muß als die einer Metallfadenlampe.

Eine besonders steile, fast senkrecht verlaufende Charakteristik besitzen Eisendrähte; in ihnen ist der Strom innerhalb gewisser Grenzen praktisch unabhängig von der Spannung; solche Eisendrahtwiderstände (in verdünntem Wasserstoff) werden deshalb benutzt, um den Strom unabhängig von Spannungsschwankungen konstant zu halten.

2d) Abhängigkeit vom magnetischen Zustande. Einige Metalle, insbesondere Wismut, besitzen die Eigenschaft, ihren spezifischen Widerstand im Magnetfelde zu ändern; bei Wismut wächst der Widerstand mit zunehmendem Magnetfelde, anfangs beschleunigt, bei größerer Feldstärke nahezu linear; bei etwa 20000 Gauß erreicht der Widerstand das Doppelte des Ausgangswertes.

2e) Abhängigkeit von der Belichtung. Ein solcher Effekt ist nur bei sehr wenigen Stoffen, insbesondere einer bestimmten Modifikation des Selens — wahrscheinlich einer Lösung von metallischem in kristallinischem Selen — bekannt; sein Widerstand sinkt im allgemeinen bei Belichtung. Das Wesen dieser Erscheinung ist noch nicht ganz aufgeklärt.

2f) Abhängigkeit von der Form. Allgemein läßt sich der Widerstand eines Leiters darstellen durch den Ausdruck

$$W = F.\sigma, \tag{10}$$

worin der Faktor σ, der spezifische Widerstand, wie oben auseinandergesetzt, nur vom Material und seinem physikalischen Zustand, der Faktor F nur von der geometrischen Form des Leiters abhängt. F ist also der Widerstand des betreffenden Leiters, wenn das Material den spezifischen Widerstand 1 hätte. Bei flüssigen Leitern ist F durch die Form des Gefäßes und der Elektroden bestimmt; hier nennt man F „die Widerstandskapazität" des Gefäßes.

Für zylindrische Leiter war oben gezeigt, daß

$$F = \frac{1}{q}$$

ist. Für die Berechnung des Widerstandes zusammengesetzter Leiter sind maßgebend die Sätze:

Bei Hintereinanderschaltung (Serienschaltung) addieren sich die Widerstände:

$$W = \Sigma\, w \tag{11a}$$

Bei Nebeneinanderschaltung (Parallelschaltung) addieren sich die Leitfähigkeiten:

$$\frac{1}{W} = \Sigma\, \frac{1}{w}; \tag{11b}$$

z. B. ist der Widerstand von zwei parallel geschalteten Widerständen w_1 und w_2:

$$W = \frac{1}{1/w_1 + 1/w_2} = \frac{w_1 w_2}{w_1 + w_2}. \tag{11c}$$

Für kompliziertere Verzweigungen berechnet man den Gesamtwiderstand aus den Kirchhoffschen Regeln (vgl. den Artikel „Elektrizitätsleitung"). Für nicht zylindrische Leiter berechnet man im allgemeinen den Widerstand, indem man rechnerisch oder graphisch den Verlauf der Stromlinien und Aequipotentialflächen ermittelt und aus ihnen Gesamtstrom, Gesamt-

Digitized by Google

spannung und daraus durch Division den Widerstand berechnet. Haben entweder die Aequipotentialflächen oder die Stromlinien konstanten Abstand, so wird die Berechnung einfacher, wenn man sich den Leiter längs der Aequipotentialflächen bezw. der Stromlinien aufgeschnitten denkt und den Gesamtwiderstand der in Serie bezw. parallelgeschalteten Volumenelemente nach Formel (11a) bezw. (11b) berechnet.

Allgemeiner Satz: Die Widerstände ähnlicher Körper aus gleichem Material verhalten sich umgekehrt wie die Längen.

Widerstandskapazitäten verschiedener Formen (zum Teil nach Winkelmanns Handbuch):

1. Abgestumpfter Kegel (Höhe l, Radien R und r):

$$F = \frac{l}{\pi R r}$$

2. Kugelschale, radial durchflossen (Dicke d = R — r):

$$F = \frac{1}{4\pi}\left(\frac{1}{r} - \frac{1}{R}\right) = \frac{1}{4\pi} \frac{d}{r R}$$

3. Unendlicher Raum außerhalb einer Kugel als Elektrode:

$$F = \frac{1}{4\pi r}$$

4. Unendlicher Raum außerhalb zweier gleicher Kugeln als Elektroden (Kugelabstand a):

$$F = \frac{1}{2\pi}\left(\frac{1}{r} - \frac{1}{a-r}\right)$$

5. Unendlicher Raum außerhalb einer sehr dünnen Kreisscheibe als Elektrode:

$$F = \frac{1}{8r}$$

6. Unendlicher Halbraum, mit einer in der Grenzebene liegenden Kreisscheibe als Elektrode:

$$F = \frac{1}{4r}$$

7. Unendlicher Halbraum, mit einem als Stromzuführung dienenden zylindrischen, senkrecht zur Grenzebene stehenden Draht vom Radius r und der Länge l:

$$F = \frac{1}{r^2\pi}(l + 0{,}8\,r)$$

8. Unendlicher Raum, außerhalb einer rechteckigen Platte als Elektrode (Seiten a und n a; $N = (1+n)^2 - \frac{8n}{\pi}$):

$$F = \frac{1}{2\pi a\sqrt{n}} \ln \frac{n + 1 + \sqrt{N}}{n + 1 - \sqrt{N}}$$

9. Hohlzylinder, radial durchflossen (Länge l):

$$F = \frac{1}{l}\frac{\ln R/r}{2\pi}$$

9a. Derselbe, tangential durchströmt:

$$F = \frac{1}{l}\frac{2\pi}{\ln R/r}$$

10. Unendliche Scheibe, in die im Abstande a zwei Drähte vom Radius r einmünden (Scheibendicke d klein gegen r):

$$F = \frac{1}{\pi d} \ln \frac{a + r}{r}$$

Bemerkungen zur vorstehenden Zusammenstellung:

Zu 1: Dient als Korrektionsformel bei zylindrischen Leitern; sie sagt aus, daß bei Abweichungen von der Zylinderform aus den Radien oder Querschnitten das geometrische Mittel zu nehmen ist.

Zu 3 bis 8: Mittels dieser Formeln berechnet sich der Uebergangswiderstand von Erdleitungsplatten (Telegraphen- und Blitzableiteranlagen).

Zu 7: Das Zusatzglied, das nahezu den gleichen Betrag wie Nr. 6 hat, heißt Ausbreitungswiderstand. Namentlich wichtig bei Herstellung von Widerstandseinheiten aus Quecksilber.

Zu 9: Die Formel stellt den inneren Widerstand der meisten galvanischen Elemente, sowie den Isolationswiderstand von Kabeln dar. Interessant ist namentlich bei letzterem, daß er nicht von der Dicke der Isolationsschicht, sondern nur vom Verhältnis der Radien abhängt, bei Kabeln von ähnlichem Querschnitt also den gleichen Betrag hat.

3. **Meßmethoden.** 3a) Beschreibung der einzelnen Methoden. 1. Strom- und Spannungsmessung. Die einfachste Methode ergibt sich aus der Definitionsgleichung (1):

$$W = \frac{E}{J} \tag{1}$$

Danach läßt sich der Widerstand durch gleichzeitige Messung von Strom und Spannung bestimmen. Schaltung nach Figur 2a; W ist der zu messende Widerstand, A der Strommesser (Amperemeter), V der Spannungsmesser (Voltmeter), B die Stromquelle (Batterie). Zu beachten ist, daß die technischen Voltmeter Strom verbrauchen; dieser Strom $\frac{E}{W_v}$ (W_v = Widerstand des Voltmeters) ist vom gemessenen Strom abzuziehen; diese Korrektion ist nur dann klein, wenn W klein gegen W_v ist. Bei großem W schaltet man zweckmäßiger nach Figur 2b; hierbei ist als Korrektion der Widerstand des Strommessers vom gemessenen Widerstande abzuziehen.

Digitized by Google

Ist die Batteriespannung konstant und bekannt, so kann das Voltmeter wegfallen; die Skala des Amperemeters wird dann zweckmäßig in Ohmwerten geeicht (technische Ohmmeter, Isolationsprüfer).

Bei unbekannter, aber konstanter Batteriespannung kann man ebenfalls das Voltmeter entbehren, wenn man zum unbekannten Widerstande W noch einen bekannten Widerstand W_0 in Serie schaltet (Fig. 2c); wird ohne W_0 (Schlüssel S geschlossen) der Strom J, mit W_0 (S geöffnet) der Strom J' gemessen, so ist

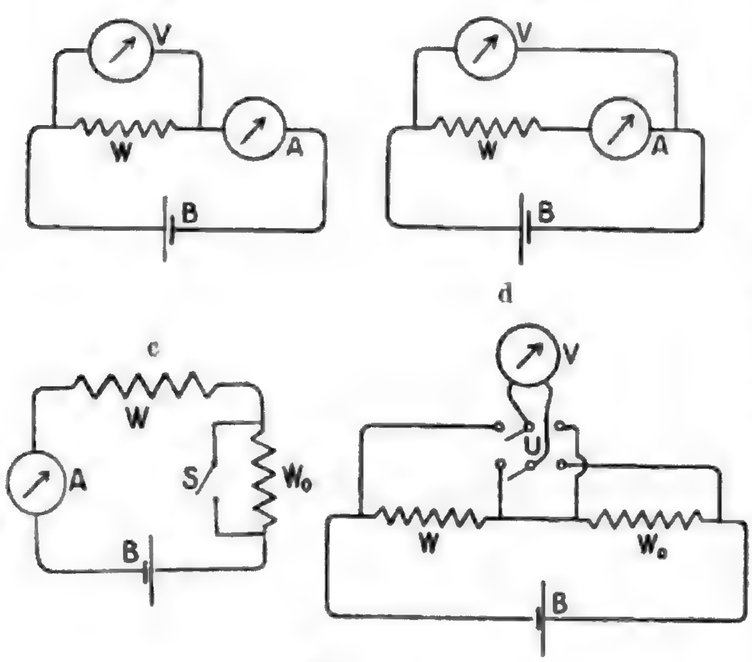


Fig. 2 a—d.

$$W' = \frac{W_0}{\frac{J}{J'} - 1};$$

W' ist darin gleich dem gesamten Widerstande des Stromkreises, einschließlich Amperemeter- und Batteriewiderstand W_A und W_B; also

$$W = W' - W_A - W_B.$$

Die Methode wird namentlich benutzt zur Messung von Batterie- und Strommesserwiderständen.

Man kann auch umgekehrt das Amperemeter weglassen und die Strommessung durch Messung der Spannung über einem bekannten Widerstande W_0 ausführen (Fig. 2d; durch den Umschalter U kann V abwechselnd an W und an W_0 gelegt werden). Mit dieser Anordnung läßt sich eine sehr große Genauigkeit erreichen, falls man die Spannungen, statt mit dem Voltmeter, mit dem Kompensationsapparat mißt (vgl. den Artikel „Elektrische Spannung").

2. Strom- und Leistungsmessung. Ebenso kann man die Definitionsgleichung (2) zur Messung benutzen:

$$W = \frac{Q}{J^2}. \qquad (2a)$$

Danach läßt sich W durch Messung des Stromes und der erzeugten Wärme, oder, da nach dem Energieprinzip die erzeugte Wärmemenge gleich der verbrauchten elektrischen Arbeit sein muß, durch Messung des Stromes und der Leistung bestimmen. Q wird entweder kalorimetrisch oder — als elektrische Leistung — wattmetrisch bestimmt. Diese Methode hat den Vorzug, auch bei beliebig schnell veränderlichen Strömen anwendbar zu sein.

3. Substitutionsmethode. Man legt den zu messenden Widerstand unter Zwischenschaltung eines Strommessers an eine konstante Batterie, und liest den Strommesser ab. Dann ersetzt man den zu messenden Widerstand durch einen Satz bekannter Widerstände (Stöpselrheostat), und schaltet von diesem soviel Widerstand ein, bis der Strommesser wieder den gleichen Ausschlag zeigt. Dann ist der zu messende Widerstand gleich dem Betrage des eingeschalteten Rheostatenwiderstandes.

4. Wheatstonesche Brücke. Stellt man eine Stromverzweigung nach Figur 3 her (B ist die Stromquelle, G ein Galvanometer, R_1 bis R_4 Widerstände), so fließt im Galvanometer (Brückenzweig) kein Strom, wenn die Relation besteht:

$$R_1 : R_3 = R_2 : R_4 \quad (12)$$

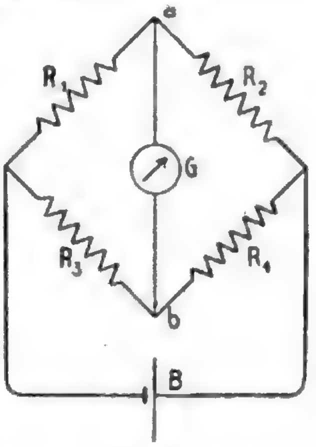


Fig. 3.

Beweis: Bezeichnen wir die Ströme in den verschiedenen Zweigen mit J_1 bis J_4, so muß, falls im Galvanometer kein Strom fließt,

$$J_1 = J_3 \text{ und } J_2 = J_4$$

sein. Ferner darf zwischen den Punkten a und b keine Potentialdifferenz bestehen, es muß also der Spannungsabfall im Zweige 1 gleich dem in 3 und im Zweige 2 gleich dem in 4 sein:

$$J_1R_1 = J_2R_2$$
$$J_1R_3 = J_2R_4$$

Digitized by Google

woraus man durch Division die obige Bedingung (12) erhält.

Da nach Figur 3 Galvanometer und Batterie an zwei symmetrischen Stellen eingeschaltet sind, kann man die beiden miteinander vertauschen; auch dann gilt bei Stromlosigkeit des Galvanometers Gl. (12). Unter Umständen kann man durch die Vertauschung die Empfindlichkeit der Einstellung erhöhen.

Zur Messung wird Beziehung (12) in der Weise benutzt, daß man als R_2, R_3, R_4 bekannte Widerstände, als R_1 den zu messenden Widerstand nimmt, und nun die ersteren solange verändert, bis das Galvanometer stromlos ist. Bei der praktischen Handhabung läßt man entweder R_3 und R_4 konstant, und verändert R_2, der dann ein Widerstandssatz (Stöpselrheostat) sein muß (Wheatstone), oder man läßt R_2 und die Summe $R_3 + R_4$ konstant und verändert nur das Verhältnis der letzteren. $R_3 + R_4$ werden dann gebildet durch einen ausgespannten oder auf einen Zylinder aufgewickelten Draht von gleichförmigem Querschnitt, auf dem ein Schleifkontakt verschiebbar angeordnet ist, von dem aus die Leitung zum Galvanometer führt. Das Verhältnis $R_3 : R_4$ ist dann gleich dem Verhältnis $l_3 : l_4$, wo l_3 und l_4 die Längen der durch den Schleifkontakt abgeteilten Stücke des Meßdrahtes sind (Kirchhoff). Figur 4 zeigt eine gebräuchliche Ausführung eines Brücken- oder Gefälldrahtes (Coehn, Ausführung von Ruhstrat). Der Draht ist auf einen Schieferzylinder in 10 oder 20 Windungen gewickelt, der Schleifkontakt sitzt an einem federnden Arm, der um die senkrechte, auf dem Zylinder aufsitzende Spindel drehbar ist und bei Verdrehung durch ein Schraubengewinde gleichzeitig in der richtigen Weise gehoben oder gesenkt wird. Eine andere Ausführung ist die Kohlrauschsche Walzenbrücke, bei der der Zylinder mit dem Brückendraht drehbar angeordnet ist.

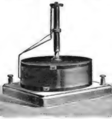


Fig. 4.

Sehr empfehlenswert sind fertige Brückenschaltungen, wie sie von den Elektrizitätsfirmen in den Handel gebracht werden. Figur 5 zeigt eine solche mit gerade ausgespanntem Kirchhoffschen Brückendraht nach Kohlrausch (Hartmann & Braun); durch die 5 Stöpsel können verschiedene Vergleichswiderstände R_2 eingeschaltet werden. Figur 6 zeigt eine Präzisionsmeßbrücke von Siemens & Halske, bei der die Widerstände R_3 und R_4 konstant sind (durch die in der Mitte sichtbaren Stöpsel können verschiedene Widerstände eingeschaltet werden), und die Abgleichung durch Veränderung des Widerstandes R_2 (Kurbelrheostat, bestehend aus den 5 in der Peripherie angeordneten Kurbeln) bewerkstelligt wird.

Fig. 5.

4a) Die Thomsonsche Doppelbrücke. Die Thomsonsche Doppelbrücke ist eine Abart der Wheatstoneschen Brücke und wird verwendet, wenn es sich um die Messung sehr kleiner Widerstände handelt. Bei solchen Widerständen ist unter Umständen der Widerstand der Zuführungskontakte

Digitized by Google

von gleicher Größenordnung wie der gesuchte Widerstand. Hier mißt man daher die Spannung nicht an denselben Punkten, an denen der Strom zugeführt wird, sondern

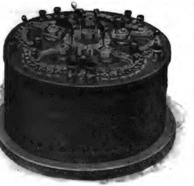


Fig. 6.

an zwei anderen Stellen, den sogenannten Spannungsklemmen (Widerstände mit getrenntem Strom- und Spannungsklemmen). Man verwendet nach Lord Kelvin (W. Thomson) die Schaltung Figur 7 (Bezeichnungen wie in Figur 3). r_1 und r_2 sind zwei weitere Widerstände. Sorgt man dafür, daß stets die Bedingung erfüllt ist:

$$\frac{R_3}{R_4} = \frac{r_1}{r_2} \text{ oder } \frac{r_1}{R_3} = \frac{r_2}{R_4} \qquad (13)$$

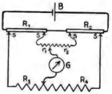


Fig. 7.

so gilt bei Stromlosigkeit des Galvanometers Gl. (12).

Beweis: Der Strom in r_1, der bei Stromlosigkeit des Galvanometerzweiges gleich dem in r_2 ist, sei i, die übrigen Ströme seien wie in 4 bezeichnet. Dann gilt:

$$R_1J_1 + r_1i = R_3J_3$$
$$R_2J_1 + r_2i = R_4J_3$$

oder

$$R_1J_1 = R_3J_3 - r_1i = R_3J_3\left(1 - \frac{r_1}{R_3}\frac{i}{J_3}\right)$$
$$R_2J_1 = R_4J_3 - r_2i = R_4J_3\left(1 - \frac{r_2}{R_4}\frac{i}{J_3}\right)$$

woraus, da n.V. (Gl. 13) $\frac{r_1}{R_3} = \frac{r_2}{R_4}$ ist, durch Division Gl. (12) folgt.

Die Abgleichung geschieht entweder durch Verändern von R_2 (durch Verschieben einer Schneide s auf einem geraden Draht), oder, wenn R_2 sich nicht verändern läßt (z. B. wenn R_2 ein genau abgeglichener Präzisionswiderstand ist) durch gleichzeitiges Verändern von R_3, R_4, r_1, r_2, so daß Bedingung (13) erfüllt bleibt.

Der Vorteil der Methode ist der, daß die einzigen mitgemessenen Uebergangswiderstände an den Spannungsklemmen s sich zu den relativ großen Widerständen r_1, r_2, R_3, R_4 addieren, denen gegenüber sie zu vernachlässigen sind. Auch für diese Methode sind fertige Schaltungen („Thomsonmeßbrücken") im Handel.

5. Methode des Differentialgalvanometers. Das Differentialgalvanometer (Becquerel) ist ein Galvanometer mit zwei gleichen Wickelungen. Zur Vergleichung gleicher Widerstände wird es in folgender Weise benutzt: Man schaltet entweder die beiden Widerstände unter Zwischenschaltung je einer Galvanometerwicklung an die gleiche Batterie (Hauptschluß), oder schaltet die beiden Widerstände hintereinander an die Batterie, und legt zu jedem Widerstande einen Galvanometerzweig parallel (Nebenschluß). Geschaltet wird so, daß die beiden Wickelungen das Galvanometer im entgegengesetzten Sinne beeinflussen; die zu vergleichenden Widerstände sind gleich, wenn der Galvanometerausschlag verschwindet (Nullmethode, ebenso wie 4 und 4a). Ungleiche Widerstände kann man durch Veränderung des Widerstandes der Galvanometerspulen vergleichen.

Praktische Bedeutung hat nur die Nebenschlußmethode, weil sie die Uebergangswiderstände zu eliminieren gestattet; daher ist die Methode besonders für kleine Widerstände geeignet.

6. Siemenssche Methode (nur für sehr große Widerstände). Man entlädt durch den zu messenden Widerstand W_x einen Kondensator von bekannter Kapazität C und mißt dessen Potentialdifferenz V mit dem Elektrometer. Sinkt V in T Sekunden von V_1 auf V_2, so ist der Widerstand des Entladungsweges

$$W = \frac{T}{C.\ln\frac{V_1}{V_2}}.$$

Zu berücksichtigen ist der endliche Isolationswiderstand W' des Kondensators selbst, der bei der Messung parallel zu W_x geschaltet ist. Der wirkliche gesuchte Widerstand ist also nach Gl. (11c):

$$W_x = \frac{WW'}{W'-W} = \frac{W}{1-\frac{W}{W'}}.$$

Digitized by Google

W' wird durch Wiederholung der Messung bei abgeschaltetem W_x bestimmt.

7. Direkt zeigende Widerstandsmesser (Ohmmeter). Die einfachste Form derartiger Instrumente (konstante Batterie und Strommesser mit Ohmskala) ist unter 1 beschrieben. Außerdem gibt es Apparate, deren Angaben unabhängig von der verwendeten Spannung sind; hier sei nur erwähnt das Brugersche Widerstandsgalvanometer. Das bewegliche System dieses Galvanometers besteht aus zwei fest verbundenen, rechtwinklig zueinander angeordneten Spulen, die in einem homogenen Magnetfelde drehbar sind, ohne im stromlosen Zustande eine bestimmte Gleichgewichtslage zu besitzen. Es läßt sich zeigen, daß, wenn die Spulen von Strömen durchflossen werden, das System sich in eine Gleichgewichtslage einstellen muß, die nur vom Verhältnis der beiden Ströme abhängt. Die eine Spule wird durch einen konstanten Vergleichswiderstand, die andere durch den zu messenden Widerstand mit einem Element verbunden. Eichung in Ohm, oder, falls der zu messende Widerstand ein Widerstandsthermometer (s. u. I 4d1) ist, direkt in Celsiusgraden.

8. Messung elektrolytischer Widerstände (Leitfähigkeit von Elektrolyten, Widerstände galvanischer Elemente). Hierbei sind die bisherigen Methoden wegen der E.M.K. der Polarisation im allgemeinen nicht anwendbar. Um von dieser Störung unabhängig zu werden, verwendet man die Methode der Wheatstoneschen Brücke (4) mit Wechselstrom (F. Kohlrausch); als Stromquelle dient ein kleiner Induktor mit Neefschem Hammer, als Nullinstrument ein Telephon. Bei der Nernstschen Anordnung werden sämtliche Vergleichswiderstände durch mit einer Lösung gefüllte Glasröhren gebildet; verwendet wird eine Lösung von Borsäure und Mannit in Wasser, deren Leitfähigkeit sehr wenig von der Temperatur abhängt.

Bei sehr großen elektrolytischen Widerständen (z. B. reinem Wasser) läßt sich auch Methode 1 anwenden, weil bei der geringen Stromstärke sich die Polarisation nur sehr langsam entwickelt und vernachlässigt werden kann.

9. Absolute Widerstandsmessung. Von den bisher aufgeführten Methoden sind zur absoluten Widerstandsmessung, d. h. zur Zurückführung einer Widerstandsmessung auf Längen-, Zeit- und Massebestimmungen, nur die Methoden 2 und 6 geeignet; bei ersterer läßt sich Q kalorimetrisch messen, und die Messung von J mit der Tangentenbussole sich auf die Messung des magnetischen Erdfeldes zurückführen; bei der anderen kann die Kapazität C aus den Dimensionen des Kondensators berechnet werden; sonst geht in die Messung nur noch das Verhältnis der Spannungen ein. Andere Methoden gehen auf das Ohmsche Gesetz (Gl. (1)) zurück: durch Induktion eines in einem bekannten Magnetfelde bewegten Leiters wird eine berechenbare E.M.K. erzeugt, die in dem zu messenden Widerstande einen mit der Tangentenbussole meßbaren Strom erzeugt.

Von Spezialausführungen sei hier die Webersche Methode angeführt; bei ihr dient der bewegte Leiter gleichzeitig als Spule der Tangentenbussole: Eine kreisringförmige Spule rotiert um eine vertikale Achse mit konstanter Winkelgeschwindigkeit; durch das magnetische Erdfeld wird in ihr ein Wechselstrom induziert, der eine im Mittelpunkt der Spule befindliche Magnetnadel dauernd ablenkt. Aus dem Ablenkungswinkel berechnet sich der Spulenwiderstand, die Größe des Magnetfeldes fällt aus der Endformel heraus. Anderen Methoden liegt die Dämpfung zugrunde, die eine schwingende Magnetnadel in einer kurzgeschlossenen Spule durch die in dieser induzierten Ströme erfährt.

3b) Anwendungsgebiet und Leistungsfähigkeit der gebräuchlichsten Meßmethoden.

Ein Teil der aufgeführten Methoden dient nur zu Spezialzwecken: 2 und 9 zu absoluten Ohmbestimmungen, 2 auch zu Widerstandsbestimmungen bei schnellen Schwingungen; 3 hat nur mehr historischen und didaktischen Wert, 6 kommt nur für sehr hohe Widerstände in Frage, 7 für technische Betriebe (z. B. Glühlampenfabriken). Für normale Widerstandsmessungen kommen nur in Betracht die Methoden 1, 4, 4a, 5. Hier ist zu unterscheiden zwischen technischen Messungen, bei denen eine Genauigkeit von 1% bis 1 ‰ genügt, und Präzisionsmessungen. Für ersteren Zweck sind die Methoden 1, 4 und 4a geeignet, und zwar 1 hauptsächlich für sehr große und sehr kleine Widerstände, weil dann bei richtiger Schaltung (Fig. 2a oder 2b) die Korrektion wegen des Meßinstrumentwiderstandes vernachlässigt werden kann; 4 für mittlere Widerstände (1 bis 100000 Ω); 4a für kleine Widerstände (unter 1 bis 10 Ω). Für Präzisionsmessungen verwendet man die Methoden 1 (Kompensationsapparat), 4, 4a, 5; 5 nur zur Vergleichung nahezu gleicher Widerstände, 4 nur für größere Widerstände, weil bei dieser Methode die Uebergangswiderstände mitgemessen werden. In bezug auf erreichbare Genauigkeit sind die vier Methoden nach Jäger nahezu gleichwertig (gleiche Wärmeentwickelung in dem zu messenden Widerstande vorausgesetzt); nur die Thomsonbrücke gibt etwas geringere Empfindlichkeit. Man kann mit diesen Methoden das Verhältnis zweier Widerstände bis auf etwa 3 Milliontel seines Betrages bestimmen.

4. Anwendungen. 4a) Schwächung und Regulierung des Stromes oder der Spannung. 1. Durch Vorschaltwiderstand. Will man in einem gegebenen Leiter vom Widerstande W mit einer ge-

Digitized by Google

gebenen Batterie von der Spannung E einen bestimmten Strom J erzeugen, so kann man das nur durch Verwendung von weiteren Widerständen erreichen. Man schaltet meist in Serie mit dem Leiter W einen Zusatzwiderstand W_1 (Vorschaltwiderstand, Fig. 8),

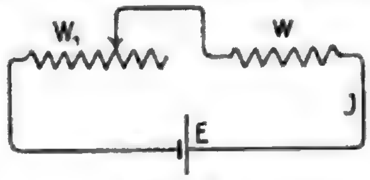


Fig. 8.

der gewöhnlich variabel ist. Dann wird der Strom in W:

$$J = \frac{E}{W_1 + W} \qquad (14)$$

kann also durch Veränderung von W_1 beliebig zwischen den Beträgen $J = 0$ ($W_1 = \infty$) und $J = \frac{E}{W}$ ($W_1 = 0$) geändert werden. Ist J vorgeschrieben, so berechnet sich, bei gegebenem E und W, W_1 nach der Formel

$$W_1 = \frac{E}{J} - W. \qquad (14a)$$

Wenn statt des Widerstandes W die Klemmenspannung e des Leiters gegeben ist, so berechnet man W_1 durch folgende Ueberlegung: Die Spannung an den Klemmen von W_1 muß gleich der Differenz $E - e$ sein, also

$$W_1 = \frac{E - e}{J} \qquad (14b)$$

In den Fällen, in denen W von J abhängt (S. 325), sind bei vorgeschriebenem J und gesuchtem W_1 die Formeln (14a und b) ebenfalls brauchbar. Handelt es sich dagegen um Berechnung von J bei gegebenem W_1, so läßt sich Formel (14) nicht anwenden; hier empfiehlt sich eine graphische Konstruktion auf Grund des oben erwähnten Charakteristikendiagramms. Wir schreiben dazu Gl. (14b) in der Form:

$$E - J . W_1 = e(J) \qquad (14c)$$

(das Symbol e (J) bedeutet, daß e von J abhängen soll) und zeichnen im Charakteristikendiagramm (Fig. 9) die beiden Kurven, deren Ordinaten einmal gleich $E - JW_1$, das andere Mal gleich e (J) sind; erstere ist eine gerade Linie, welche die Ordinatenachse bei der Ordinate E schneidet und mit der Abszissenachse den Winkel $\varphi = \text{arc tg } W_1$ bildet („Widerstandslinie"); die andere Kurve ist die Charakteristik des Leiters W. Dann ist die Lösung von Gl. (14c) durch den Schnittpunkt S der beiden Kurven bestimmt, der gesuchte Strom J ist gleich der Abszisse von S.

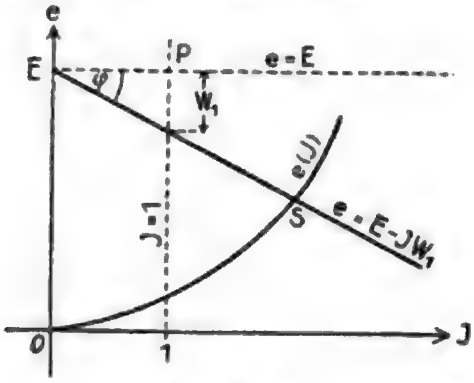


Fig. 9.

Das Diagramm Figur 9 kann auch zur graphischen Ermittelung von W_1 bei vorgeschriebenem J dienen; man verbindet dazu den dem gewünschten Betriebszustande des Leiters W entsprechenden Punkt S (der natürlich auf der Charakteristik liegen muß) mit dem Punkte der Ordinatenachse, dessen Ordinate gleich E ist, durch eine gerade Linie; ist φ deren Neigungswinkel gegen die Abszissenachse, so ist

$$W_1 = \text{tg}\varphi.$$

W_1 läßt sich direkt aus dem Diagramm entnehmen, indem man die Parallelen zur Abszissen- bezw. Ordinatenachse $e = E$ und $J = 1$ zieht; ihr Schnittpunkt sei P, dann schneidet die Widerstandslinie auf der Geraden $J = 1$ ein Stück ab, das, von P aus gerechnet, gleich W_1 ist.

2. Durch Abzweigung. Ergibt sich aus Gl. (14a) oder (14b) der Vorschaltwiderstand größer als die vorhandenen Widerstände, so schaltet man nach Figur 10a, indem man die Batterie durch einen Widerstand schließt und den Leiter W parallel zu einem Teile dieses Widerstandes schaltet. Um den Strom in W verändern zu können,

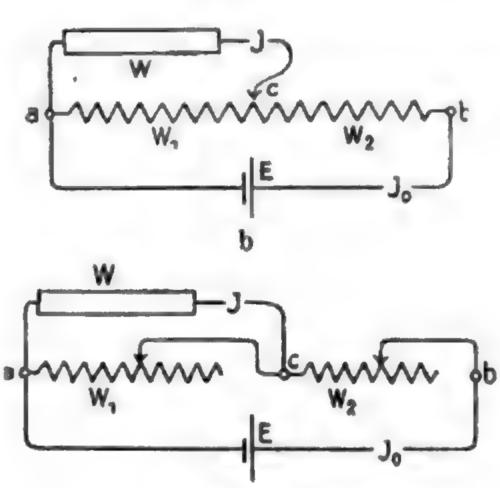


Fig. 10 a, b.

legt man entweder zwischen die Punkte a und b einen konstanten Widerstand, von dem man einen veränderlichen Teil mittels eines Schleifkontaktes oder einer Kurbel herausgreift (Fig. 10a), oder, falls bei den verfügbaren Widerständen nur einer der Punkte a und b zugänglich ist, schaltet

Digitized by Google

man zwischen a und c, sowie zwischen c und b je einen einfachen variablen Widerstand (Fig. 10b).

Die Abzweigschaltungen Figur 10a und b haben vor der gewöhnlichen Schaltung Figur 8 den Vorteil, daß sie auch dann anwendbar sind, wenn der Apparat W überhaupt keinen Strom verbraucht (den Widerstand ∞ hat), z. B. beim Eichen von Elektrometern. In diesem Fall berechnet sich die Spannung e an W in folgender Weise, wenn wir den Widerstand zwischen a — c mit W_1, zwischen c — b mit W_2 und den Batteriestrom mit J_0 bezeichnen: Es ist

$$E = J_0(W_1 + W_2),$$
$$e = J_0 W_1,$$

also

$$e = E \frac{W_1}{W_1 + W_2}, \qquad (15)$$

also ist, wenn, wie in Figur 10a, $W_1 + W_2$ konstant ist, e proportional mit W_1. Von dieser Beziehung wird Gebrauch gemacht bei der Kompensationsmethode zur Messung von Potentialdifferenzen sowie bei den Kompensationsapparaten (vgl. den Artikel „Elektrische Spannung"). Formel (15) gilt, wie gesagt, nur, wenn der Strom J in W gleich Null ist. Ist J von Null verschieden, so wird e kleiner (weil W_1 durch Parallelschaltung des endlichen Widerstandes W verkleinert wird). In diesem Falle findet man für e in Abhängigkeit von dem gebrauchten Strome J:

$$e = E \frac{W_1}{W_1 + W_2} - J \frac{W_1 W_2}{W_1 + W_2}, \qquad (15a)$$

d. h. die Anordnung (ohne den Leiter W) verhält sich so, als ob an den Klemmen ac eine Batterie von der E.M.K. $E \frac{W_1}{W_1 + W_2}$ mit vorgeschaltetem Widerstande $\frac{W_1 W_2}{W_1 + W_2}$ (d. h. dem Widerstande, den die parallelgeschalteten Widerstände W_1 und W_2 besitzen) läge; graphisch stellt Gl. (15a) also auch eine gerade Linie nach Art der Widerstandslinie in Figur 9 dar.

Ist der entnommene Strom J klein, so ist die Spannung an den Klemmen a c nahezu unabhängig von J. Man verwendet diese Schaltung deshalb auch, um Apparate mit einer konstanten Spannung zu betreiben (z. B. kleine Nebenschlußmotoren, die dann mit nahezu konstanter, von der Belastung unabhängiger Umdrehungszahl laufen).

4b) Energieverlust und Spannungsabfall bei der Erzeugung, Fortleitung und Umsetzung elektrischer Energie. 1. Bei der Erzeugung der Energie. Sämtliche Stromquellen oder Generatoren (Dynamomaschinen, Elemente) besitzen einen von Null verschiedenen „inneren Widerstand" W_i. Das hat zur Folge:

α) Die Klemmenspannung e des Generators bleibt bei Belastung nicht gleich der elektromotorischen Kraft (E.M.K.) E, sondern wird um den inneren Spannungsabfall $e_i = JW_i$ verkleinert:

$$e = E - JW_i; \qquad (16)$$

wenn also, wie es vielfach der Fall ist, E unabhängig von J ist, ist die Charakteristik des Generators, d. h. die Kurve, welche e als Funktion von J darstellt, eine die Ordinatenachse bei der Ordinate e = E schneidende gerade Linie (Fig. 11), deren

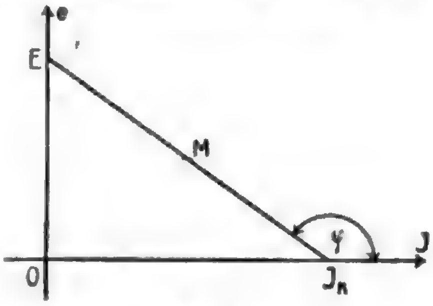


Fig. 11.

Neigungswinkel φ gegen die Abszissenachse bestimmt ist durch

$$\operatorname{tg}\varphi = -W_i.$$

Der vom Generator abgegebene Strom kann bei Abwesenheit anderer Generatoren nicht größer werden als $\frac{E}{W_i} = J_k$ (Kurzschlußstrom).

Da von den Stromquellen meistens konstante Klemmenspannung verlangt wird, ist der innere Spannungsabfall unerwünscht und muß durch Kleinhaltung von W_i möglichst klein gemacht werden. Die von einem Generator mit dem inneren Widerstande W_i abgegebene Leistung ist

$$A = e.J = (E - JW_i)J.$$

Sie besitzt ein Maximum für

$$\frac{\partial A}{\partial J} = E - 2JW_i = 0,$$

wenn also der innere Spannungsabfall gleich der halben E.M.K. ist (Punkt M, Fig. 11), d. h. wenn der Widerstand W_a des äußeren Stromkreises gleich dem inneren Widerstande des Generators ist:

$$W_i = W_a. \qquad (17)$$

Ein ähnlicher Satz gilt, wenn es sich darum handelt, mit einer Anzahl von Elementen in einem Stromkreise von gegebenem Widerstande W_a einen möglichst großen Strom hervorzubringen; wegen des inneren Widerstandes W_i ist es nicht immer das günstigste, alle Elemente in Serie zu schalten, weil dann der Strom nicht größer werden kann als der Kurzschlußstrom eines Ele-

Digitized by Google

mentes; es gilt hier folgender Satz: Der im äußeren Widerstande W_a fließende Strom wird am größten, wenn die Batterie so geschaltet wird, daß ihr gesamter innerer Widerstand gleich dem äußeren Widerstande W_a ist.

β) Die vom Generator abgegebene elektrische Energie ist nicht gleich der in ihm erzeugten elektrischen Energie, sondern kleiner um den Betrag der in W_i erzeugten Jouleschen Wärme, der innere Widerstand bewirkt also einen Energieverlust

$$V = J^2 W_i$$

und damit eine proportional dem Strome und dem Widerstande W_i wachsende Abnahme des Wirkungsgrades, die, namentlich bei Dynamomaschinen, aus ökonomischen Gründen durch Verkleinerung von W_i möglichst klein gehalten werden muß.

γ) Die erzeugte Joulesche Wärme J^2W_i erwärmt den Generator, so daß seine Temperatur unzulässig hohe Werte annehmen kann. Auch aus diesem Grunde muß W_i möglichst klein gehalten werden.

Alle diese unerwünschten Wirkungen des elektrischen Widerstandes wachsen mit zunehmendem Strom; um also Spannungsabfall, Verluste und Erwärmung nicht zu groß werden zu lassen, darf man mit dem Strom nicht über eine gewisse Grenze gehen, durch den inneren Widerstand der Generatoren wird also ihre Belastbarkeit eingeschränkt. Um einen Generator möglichst leistungsfähig zu machen, muß man daher seinen inneren Widerstand möglichst klein machen. Bei vorgeschriebenen Abmessungen des Generators erreicht man das durch Verwendung eines möglichst gut leitenden Elektrolyten und großer Elektroden von geringem Abstande bei Elementen und Akkumulatoren, durch Verwendung von bestleitendem Kupfer und gute Ausnutzung des vorhandenen Wicklungsraumes (z. B. Verwendung von Leitern mit rechteckigem Querschnitt) bei Dynamomaschinen. Außerdem kann man W_i durch Vergrößerung des Generators verkleinern; wie oben gezeigt, ist ja bei ähnlichen Körpern der Widerstand umgekehrt proportional den Längen. Der innere Widerstand bildet also den eigentlichen Grund der fast selbstverständlichen Tatsache, daß die Leistung der Generatoren mit ihrer Größe zunimmt.

2. Bei der Fortleitung der Energie. Auch in den Leitungen findet wegen deren Widerstand Spannungsabfall, Energieverlust, Wärmeentwickelung statt; alle drei Erscheinungen sind unerwünscht und werden durch Kleinhaltung des Leitungswiderstandes möglichst herabgedrückt. Aus diesem Grunde wählt man als Leitungsmaterial einen Stoff von möglichst geringem spezifischem Widerstande, im allgemeinen Kupfer, jedoch kommen auch noch andere Eigenschaften des Leitungsmaterials, nämlich Preis, spezifisches Gewicht und Zugfestigkeit (für Freileitungen) in Frage. Aus diesem Grunde ist unter Umständen die Verwendung von Aluminium vorteilhaft; manchmal wird auch Eisen (Telegraphenleitungen) verwendet.

Die schädlichen Wirkungen des Widerstandes (Spannungsabfall JW, Energieverlust und Wärmeentwickelung J^2W) hängen nicht nur vom Widerstande, sondern auch von der Stromstärke J ab und werden bei abnehmendem Strome kleiner. Handelt es sich daher um Uebertragung einer bestimmten Energie E.J, so werden die Verluste um so kleiner, je kleiner J, d. h. je größer die Spannung E ist. Begrenzt wird die Spannung durch die Kosten der Erzeugungs- und Umsetzungsapparate (Transformatoren) sowie die bei sehr hoher Spannung auftretenden Isolationsschwierigkeiten. Man verwendet deshalb extrem hohe Spannungen — heute sind Anlagen mit 110000 Volt in Betrieb — nur bei sehr langen Leitungen und großen Leistungen. Ist einmal die Spannung festgesetzt, so berechnet man die Leitungen, entsprechend den drei Wirkungen des Widerstandes, nach drei Gesichtspunkten:

α) Auf Spannungsabfall („Elastizität"). Der Spannungsabfall zwischen Erzeugerstation und Verbrauchsstation soll bei dem vollen Strom nicht über ein gewisses Maß (5 bis 15% der Gesamtspannung) steigen.

β) Auf Erwärmung. Die Temperatur des Leiters soll nicht über einen gewissen Betrag steigen. Die Temperaturerhöhung ist abhängig von den Abkühlungsverhältnissen. Bei frei ausgespannten Drähten, bei denen die Wärmeabgabe im wesentlichen durch Konvektion erfolgt, kann man die pro sec abgegebene Wärme proportional der Temperaturdifferenz T gegen die Umgebung und der Oberfläche annehmen. Da die fortgeführte Wärme gleich der erzeugten sein muß, wird bei Leitern von kreisförmigem Querschnitt (C_1 bis C_4 sind Konstanten):

$$J^2W = J^2 \frac{l\sigma}{r^2\pi} = C_1 T l . 2r\pi$$

$$J^2 = \frac{C_1 . 2\pi^2}{\sigma} T r^3 = C_2 T r^3; \qquad (18)$$

also bei vorgeschriebener Temperaturerhöhung T:

$$r = C_3 . J^{\frac{2}{3}}$$

oder

$$r^2\pi = q = C_4 . J^{\frac{4}{3}} \qquad (18a)$$

Genauere Messungen haben indessen ergeben, daß diese Beziehungen nur angenähert stimmen. Tabelle III gibt für Kupferleitungen von verschiedenen Querschnitten die höchstzulässige Strombelastung J_{max} an; die Temperaturerhöhung ist zu 20° C angenommen.

Digitized by Google

Tabelle III.
Aus den Vorschriften des Verbandes deutscher Elektrotechniker:

q	J_{max}	q	J_{max}
mm^2	Amp	mm^2	Amp
0,75	9	16	75
1	11	25	100
1,5	14	50	160
2,5	20	120	280
4	25	240	450
6	31	500	760
10	43	1000	1250

Bei in der Erde verlegten Kabeln erfolgt die Wärmeabgabe nur durch Leitung. Hier ändert sich die abgeführte Wärmemenge nur wenig (logarithmisch) mit den Leiterdimensionen, so daß bei vorgeschriebener Temperaturerhöhung annähernd die erzeugte Wärmemenge

$$J^2W = J^2 \frac{l}{q} \sigma = \text{constans}$$

sein muß, d. h. die höchstzulässige Strombelastung ist nahezu proportional der Wurzel aus dem Querschnitt. Der zulässige Maximalstrom ist, namentlich bei kleinen Querschnitten, erheblich größer, als bei frei verlegten Leitungen, er beträgt z. B. bei 1 qmm Leiterquerschnitt 24 Ampere.

γ) Auf Wirtschaftlichkeit. Die gesamten laufenden Kosten (einschl. Amortisation und Verzinsung der Anlage) sollen ein Minimum sein. Hierfür hat Thomson eine einfache Regel abgeleitet: Die Gesamtkosten sind gleich den Kosten der verlorenen Energie J^2W, vermehrt um die Kosten für Amortisation und Verzinsung der Anlage. Der erste Anteil ist umgekehrt proportional dem Leitungsquerschnitt q, etwa gleich $\frac{C_1}{q}$, der andere proportional den Anlagekosten, die wir proportional dem Gewicht, also dem Querschnitt der Leitung, gleich $C_2 . q$ setzen können. Die Gesamtkosten werden also nach der Formel gefunden:

$$K = \frac{C_1}{q} + C_2 . q.$$

K erreicht ein Minimum, wenn

$$\frac{\partial K}{\partial q} = -\frac{C_1}{q^2} + C_2 = 0$$

oder

$$\frac{C_1}{q} = C_2 q \qquad (19)$$

ist, wenn also die Kosten der verlorenen Energie gleich den übrigen Kosten sind (Thomsonsche Regel).

3. Bei den Umsetzungen der Energie. Dieselben schädlichen Wirkungen hat der innere Widerstand der Apparate, die zur Umsetzung der Energie in andere Formen (mechanische, chemische, magnetische Energie) dienen, kurz, bei Energieverbrauchern. Er bewirkt einmal, daß nur ein Bruchteil der an den Klemmen verfügbaren Spannung für den Umsetzungsvorgang verwandt wird, zweitens, daß nicht alle verbrauchte Energie dem Umsetzungsprozeß zugeführt wird, daß also der elektrische Wirkungsgrad des Verbrauchers kleiner als 1 wird, und drittens, daß der Apparat sich erwärmt. Nur bei Verbrauchern, die zur Umwandlung der elektrischen Energie in Wärme dienen (Heizwiderständen, Glühlampen usw.), trifft das nicht zu, weil hierbei die im Widerstande erfolgende Energieumsetzung gerade beabsichtigt ist: der elektrische Wirkungsgrad solcher Apparate ist stets gleich 1. Bei allen anderen Verbrauchern hingegen (namentlich Elektromotoren) begrenzt der innere Widerstand, ebenso wie oben bei den Generatoren auseinandergesetzt, die Belastungsfähigkeit.

Dasselbe gilt auch für Apparate, die nicht eigentlich zur Energieumsetzung dienen. Hierher gehören die Elektromagnete, sowie alle Apparate, in denen es darauf ankommt, durch den elektrischen Strom ein möglichst starkes magnetisches Feld zu erzeugen (z. B. Meßinstrumente, insbesondere Galvanometer). Der Widerstand der das Magnetfeld erregenden Spulen hat bei Elektromagneten vor allem die Wirkung, daß die Spule sich erwärmt und dadurch die zulässige Stromstärke beschränkt; bei Meßinstrumenten ist die in ihnen verbrauchte Energie J^2W unerwünscht. Zwischen dem Energieverbrauch J^2W und der Stärke des erzeugten Magnetfeldes besteht folgende Beziehung: Bei gegebener Spulenform ist die Stärke des Magnetfeldes gleich

$$H = CNJ$$

(N ist die Windungszahl der Spule, C eine Konstante). Ist L die mittlere Länge einer Windung, Q der Querschnitt des Wickelungsraumes (senkrecht zur Drahtrichtung gemessen), so ist der Spulenwiderstand:

$$W = \frac{l}{q} . \sigma = \frac{N . L}{\left(\frac{Q}{N}\right)} . = N^2 \frac{L}{Q} . \sigma$$

also

$$J^2W = J^2N^2 \frac{L}{Q} . \sigma = \left(\frac{H}{C}\right)^2 \frac{L}{Q} . \sigma$$

$$H = C \sqrt{J^2W \frac{L\sigma}{Q}}. \qquad (20)$$

Bei gegebenen Spulendimensionen ist daher das Magnetfeld unabhängig von Windungszahl und Widerstand der Spule proportional der Wurzel aus dem Energieverbrauch J^2W. Es ist also der mit einem Elektromagneten gegebener Größe erreich-

Digitized by Google

bare Höchstwert der Feldstärke unabhängig von der Windungszahl. Bei Meßinstrumenten ist, da ihr Ausschlag durch das vom Strome erzeugte Magnetfeld bestimmt ist, der Energieverbrauch bei gleicher Spulengröße unabhängig vom Spulenwiderstande.

Bei Galvanometern ist noch ein zweiter Satz wichtig, wenn es sich darum handelt, mit einer gegebenen Stromquelle (z. B. einer Thermosäule) in einem Galvanometer einen möglichst großen Ausschlag hervorzurufen. Man muß dazu nach Gl. (20) den Widerstand des Instrumentes so wählen, daß ihm eine möglichst große Leistung zugeführt, also der Batterie eine möglichst große Leistung entnommen wird, und das ist nach Gl. (17) dann der Fall, wenn der Widerstand des äußeren Stromkreises, hier also der Widerstand des Galvanometers, gleich dem inneren Widerstande der Batterie ist.

4c) Erzeugung von Wärme durch den elektrischen Strom. 1. Zum Heizen. Während bei den bisher betrachteten Vorgängen die Wirkungen des elektrischen Widerstandes unerwünscht waren, werden sie andererseits auch vielfach ausgenutzt, um die elektrische Energie in Wärme umzusetzen. Zwar sind die Kosten der elektrischen Energie, wegen des geringen Wirkungsgrades der thermischen Motoren, im allgemeinen wesentlich höher als die der direkt aus Kohle oder Gas erzeugten Wärmeenergie; dafür läßt sich aber die aus Elektrizität erzeugte Wärme den zu erwärmenden Körpern fast verlustlos zuführen. Ein weiterer Vorzug der elektrischen Heizung ist der, daß der zu erwärmende Körper weder mit den Verbrennungsprodukten (Heizgasen), noch mit dem Luftsauerstoff in Berührung zu kommen braucht; auch kann die Wärmewirkung auf sehr kleine Räume konzentriert werden. Die Höhe der erreichbaren Temperatur ist nur durch das schließlich eintretende Schmelzen und Verdampfen aller bekannten festen Stoffe beschränkt.

Die wichtigsten Verwendungsgebiete der elektrischen Wärmeerzeugung sind:

Heizung von Wohnräumen.

Kochen — hierbei werden entweder Heizplatten elektrisch erwärmt, auf welche die Gefäße aufgesetzt werden, oder der Heizwiderstand wird im Kochgefäß selbst untergebracht.

Laboratoriumsöfen zur Erzeugung hoher Temperaturen — sie bestehen meist aus einem Rohr aus feuerfestem Material, das mit Widerstandsdraht umwickelt ist, oder aus einem Rohr aus leitendem Material (Kohle, Iridium), das selbst vom Strom in axialer Richtung durchflossen wird.

Hüttenwesen — der durch den Strom erwärmte Widerstand wird durch das Schmelzgut selbst gebildet; man führt den Strom entweder durch Elektroden aus Kohle oder Graphit zu (Stahlöfen von Gin, Héroult, Karbidöfen), oder man benutzt die ringförmig gestaltete Schmelzrinne direkt als Sekundärwindung eines Transformators (Kjellin).

Schweißen — man bringt die beiden zu schweißenden Stücke zur Berührung und schickt durch die Berührungsstelle einen Strom.

Die Galvanokaustik in der Medizin (Wegbrennen von Wucherungen mittels elektrisch geglühter Platindrähte).

Elektrisches Minenzünden (durch ins Glühen gebrachte Platindrähte) usw.

2. Bei den Glühlampen. Auch der wichtigste Teil der elektrischen Beleuchtung, die Glühlampenbeleuchtung, beruht auf der Wärmeentwickelung in einem Widerstande: Die elektrischen Glühlampen bestehen im wesentlichen aus Widerstandsdrähten, die einmal zur Vermeidung von Oxydation, andererseits zur Vermeidung von Wärmeverlusten durch Leitung und Konvektion, im luftleeren Raum angeordnet sind. Als Drahtmaterial kam früher fast ausschließlich Kohle in Frage; neuerdings kommen die Metallfadenlampen immer mehr auf, bei denen der Draht aus Osmium-, Tantal- oder (jetzt fast ausschließlich) Wolframmetall besteht. Da bei einem glühenden Körper das Verhältnis der sichtbaren Strahlung zur Gesamtstrahlung mit steigender Temperatur sehr stark zunimmt (Wiensches Verschiebungsgesetz), muß eine Glühlampe um so ökonomischer sein, je stärker der Faden erhitzt wird; die höchstzulässige Erhitzung wird aber beschränkt durch die schließlich eintretende Zerstäubung des Fadens, welche die Lebensdauer der Lampe vermindert. So ergibt sich für jede Lampe eine bestimmte Temperatur bezw. spezifische Belastung, bei der die Gesamtkosten (Strom + Lampenersatz) ein Minimum werden. Da diese günstigste Temperatur bei den Metallfadenlampen erheblich höher liegt als bei Kohlenfadenlampen, so ist der spezifische Energieverbrauch (Watt pro Hefnerkerze) bei den Metallfadenlampen viel geringer (0,8 bis 1,7 Watt/H.K.) als bei den Kohlenfadenlampen (2,5 bis 4 Watt/H.K.). Bei den Nernstlampen besteht der durch den Strom erhitzte Leiter aus Oxyden gewisser Erdmetalle, die bei sehr hoher Temperatur zu Leitern des Stromes werden. Die Stromleitung ist zum Teil elektrolytisch, an der Kathode wird Metall abgeschieden, aber durch den Luftsauerstoff gleich wieder oxydiert. Daher können die Nernstlampen

Digitized by Google

nicht im Vakuum brennen. Im kalten Zustande ist der Leuchtkörper nichtleitend, er muß daher durch eine besondere Vorrichtung (Platinspirale) angeheizt werden. Der Widerstand von Nernstlampen besitzt einen derartig großen negativen Temperaturkoeffizienten, daß beim normalen Betriebsstrom die Klemmenspannung der Lampe fast unabhängig vom Strom ist und unter Umständen sogar mit zunehmendem Strome abnimmt. Solche Leiter mit einer abfallenden Charakteristik können nicht ohne weiteres an eine konstante Netzspannung angeschlossen werden, weil dann der elektrische Zustand dieses Systems, ähnlich wie beim Lichtbogen (vgl. den Artikel „Lichtbogenentladung") labil wäre; daher kann ein Nernstscher Glühkörper nur mit einem Vorschaltwiderstande stabil brennen, dessen Charakteristik eine bestimmte Mindeststeilheit haben muß; man verwendet dazu die oben (S. 325) erwähnten Eisendrahtwiderstände in verdünntem Wasserstoff, deren Charakteristik schon bei geringem Widerstandsbetrage genügend steil verläuft; in ihm werden etwa 10 bis 15% der im Nernstkörper verbrauchten Energie vernichtet. Aus diesem Grunde und vor allem, weil die Lampe nicht im Vakuum brennen kann, ist ihr spezifischer Energieverbrauch ungünstiger als bei Metallfadenlampen, nämlich 1,7 bis 2 Watt/H.K.

3. Bei Messungen. Endlich wird die Wärmewirkung des elektrischen Stromes vielfach zu Meßzwecken benutzt, und zwar

α) zu thermischen Messungen, wenn es sich darum handelt, einem Körper eine bestimmte Wärmemenge zuzuführen (z. B. bei Messungen der spezifischen Wärme); die elektrische Widerstandserhitzung hat hier vor allen anderen Verfahren den Vorzug, daß die erzeugte Wärmemenge sehr einfach und sehr genau in absolutem Energiemaß gemessen werden kann, nämlich durch Messung der verbrauchten elektrischen Energie E.J;

β) zur Strommessung, indem man die Temperaturerhöhung eines von dem zu messenden Strome durchflossenen Widerstandes bestimmt. Die Temperaturerhöhung wird auf verschiedene Weise bestimmt:

$\alpha\alpha$) Hitzdrahtinstrumente. In den Hitzdrahtinstrumenten (Cardew, Hartmann & Braun) wird der zu erhitzende Widerstand durch einen feinen Draht aus Platinsilber oder neuerdings Platiniridium gebildet, der sich infolge der Erwärmung ausdehnt; die Längenänderung bewirkt auf mechanischem Wege die Drehung eines Zeigers.

$\beta\beta$) Luftthermometer: Der vom Strom geheizte Widerstand befindet sich in einem Luftthermometer, d. i. einem mit Luft gefüllten Glasgefäße, das mit einem Flüssigkeitsmanometer verbunden ist; die durch die Erwärmung bewirkte Ausdehnung der Luft ruft eine Druckerhöhung hervor, die vom Manometer angezeigt wird.

$\gamma\gamma$) Thermoelemente und Thermogalvanometer. Um zu höherer Empfindlichkeit zu gelangen, mißt man die Temperaturerhöhung durch ein in der Nähe des durch den Strom geheizten Widerstandes befindliches Thermoelement mit Galvanometer. Eine besondere Ausführungsform dieses Gedankens ist das Duddellsche Thermogalvanometer, im Prinzip ein Drehspulgalvanometer, bei dem die bewegliche Spule aus einer einzigen geschlossenen Windung besteht, die das Thermoelement enthält: letzteres befindet sich dicht über dem Heizwiderstande (heater). Dieses Instrument ist eins der empfindlichsten Wechselstrommeßinstrumente; mit ihm lassen sich noch Wechselströme nachweisen, deren Energie weniger als 10^{-7} Watt beträgt.

$\delta\delta$) Barretter. Die Temperaturerhöhung läßt sich auch durch Messung der Widerstandserhöhung bestimmen, die der von dem zu messenden Strome erhitzte Leiter erleidet; man verwendet zu diesem Zweck sehr feine Drähte (Wollastondrähte), die vorteilhaft in ein evakuiertes Gefäß eingeschlossen werden; solche Anordnungen nennt man Barretter (vgl. unten unter Ziffer I 4 d 2).

$\varepsilon\varepsilon$) Relais und Sicherungen. Nach dem Prinzip der Hitzdrahtinstrumente lassen sich natürlich auch Relais konstruieren, z. B. werden Maximalausschalter in dieser Weise gebaut. Eine besonders einfache Art von Maximalausschaltern sind die Schmelzsicherungen (Edison), das sind Drähte, aus Blei oder Silber, deren Querschnitt so bemessen ist, daß sie bei Ueberschreitung einer bestimmten Stromstärke durchschmelzen und so den Stromkreis unterbrechen. Alle elektrischen Starkstromleitungen werden heute auf diese Weise gegen zu hohe Stromstärke gesichert.

4d) Messung und Nachweis anderweitiger physikalischer Vorgänge durch Messung der durch sie bewirkten Widerstandsänderung. 1. Widerstandsthermometer. Die Temperaturabhängigkeit des Widerstands bei reinen Metallen wird benutzt, um Temperaturen zu messen. Diese Methode ist besonders bequem, wenn es sich darum handelt, die Temperatur elektrischer Apparate, z. B. von Maschinenwickelungen, Magnetspulen usw. zu bestimmen: man verwendet aber auch besondere „Widerstandsthermometer", die einfach aus einem Metalldraht (meistens

Digitized by Google

Platin) bestehen, dessen Widerstand nach einer der oben beschriebenen Methoden bestimmt wird; man verwendet gewöhnlich die Wheatstonesche Brücke oder das Widerstandsgalvanometer, für sehr genaue Messungen die Thomsonbrücke oder das Differentialgalvanometer und kann so die Temperatur bis auf weniger als $^1/_{10000}$ Grad C messen (Jäger). Mit den käuflichen Widerstandsthermometern lassen sich Temperaturen von — 200 bis + 900° C messen.

2. Bolometer und Barretter. Führt man einem Widerstandsthermometer von außen her Energie zu (durch Strahlung oder durch direkte elektrische Widerstandserhitzung), so erwärmt es sich; die Temperaturerhöhung gibt ein Maß für die pro Zeiteinheit zugeführte Energie. Solche, speziell zur Strahlungsmessung dienende Widerstandsthermometer heißen Bolometer; ihr Widerstandskörper besteht gewöhnlich aus sehr feinem, geschwärztem Platinblech. Ihr Vorzug gegenüber anderen Anordnungen (Thermosäulen) ist, abgesehen von ihrer Empfindlichkeit, der, daß sie leicht in absolutem Energiemaße geeicht werden können (durch direkte elektrische Widerstandserhitzung).

Solche Bolometer lassen sich auch zur Messung von Wechselströmen verwenden, indem man die Widerstandserhöhung mißt, die durch den das Bolometer durchfließenden Wechselstrom hervorgerufen wird; solche Anordnungen heißen, wie oben erwähnt, Barretter. Hierbei muß der Widerstand gleichzeitig von Gleichstrom (zur Widerstandsmessung) und von Wechselstrom durchflossen werden; es muß Sorge getragen werden, daß weder der Wechselstrom die übrigen Brückenzweige durchfließt, noch der Wechselstromkreis einen Nebenschluß für den Brückenstromkreis bildet. Man erreicht das entweder durch Verwendung von Selbstinduktionen (Drosselspulen) und Kondensatoren oder, nach Rubens und Paalzow, indem man den Bolometerwiderstand aus 4 Stücken zusammensetzt, die selbst wieder nach Art einer Wheatstoneschen Brücke geschaltet sind (Fig. 12). Ist für diese 4 Stücke die Gleichgewichtsbedingung der Wheatstoneschen Brücke erfüllt, so erzeugt der an den Punkten a und b zugeführte Gleichstrom zwischen den Zuführungsstellen c und d des Wechselstromes keine Potentialdifferenz und ebensowenig der bei c und d zugeführte Wechselstrom zwischen a und b; es kann also weder der Gleichstrom in den Wechselstromkreis, noch der Wechselstrom in den Gleichstromkreis eindringen.

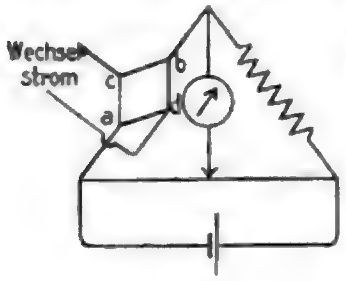


Fig. 12.

3. Selenzellen. Die oben angeführte Eigenschaft des Selens, seinen Widerstand mit der Belichtung zu ändern, wird benutzt um Lichtintensitäten zu messen oder Aenderungen derselben nachzuweisen. Man macht von diesem Verfahren Gebrauch:

bei der Photometrie,

bei der Lichttelephonie (vgl. den Artikel „Lichtbogenentladung"),

bei dem Kornschen Verfahren der Fernphotographie (vgl. den Artikel „Fernphotographie").

4. Wismutspirale. Wie oben angeführt ändert Wismut seinen Widerstand im Magnetfelde; diese Eigenschaft wird zur Messung magnetischer Felder benutzt. Man verwendet das Wismut in Form einer zur Vermeidung von Induktionswirkungen bifilar gewickelten flachen Spirale, deren Widerstand in der Brücke bestimmt wird. Das Verfahren eignet sich für Felder von etwa 2000 Gauß an aufwärts; die Genauigkeit ist nicht sehr groß, weil der Effekt stark von der Temperatur abhängt.

5. Mikrophon. Der Widerstand loser Kontakte ändert sich mit dem Drucke, mit dem die Stücke aufeinander gepreßt werden; man kann so Druckänderungen, wie sie durch Bewegungen erzeugt werden, in Widerstandsänderungen und damit in Stromänderungen umsetzen. Auf diese Weise werden im Mikrophon die Schwingungen der Membran in Stromänderungen umgesetzt. Näheres darüber siehe in den Artikeln „Telegraphie" und „Telephonie".

II. Widerstand als Konkretum (= Rheostat).

Je nach dem Verwendungszweck unterscheidet man: Meßwiderstände d. h. Widerstände, deren Widerstandsbetrag auf einen bestimmten Wert abgeglichen ist; sie werden zu Messungen gebraucht (I 3); Regulier- und Belastungswiderstände, d. h. Widerstände, die dazu dienen, in einem Gebrauchsapparat den Strom auf einen bestimmten Betrag einzustellen oder einem Generator einen bestimmten Strom zu entnehmen (I 4 a); Heizwiderstände, in denen elektrische Energie in Wärme umgewandelt werden soll (I 4 c).

1. Meßwiderstände. 1a) Anforderungen. Ein Widerstand muß folgenden Anforderungen genügen: 1) Sein Nennbetrag muß unabhängig von äußeren Versuchsbedingungen sein; insbesondere muß er

α) unabhängig von der Temperatur sein; β) darf er sich mit der Zeit nicht ändern (keine Alterungserscheinungen zeigen). 2). Es dürfen in ihm keine anderen Potentialdifferenzen und Ströme auftreten, als die aus dem Ohmschen Gesetz folgenden, daher darf α) das Widerstandsmaterial keine merkliche Thermokraft gegen das Material der Zuleitungen (Kupfer) besitzen, β) muß bei Widerständen, die auch für Messungen mit veränderlichen Strömen benutzt werden sollen, Selbstinduktion und Kapazität klein sein, weil sonst zu der Spannung J.W noch die an der Selbstinduktion auftretende Spannung $L\frac{dJ}{dt}$ und zum Strom J noch der durch die Kapazität fließende Strom $C\frac{dE}{dt}$ hinzutreten würde.

1b) Verwendetes Material. In der Auswahl des Materials ist man vor allem durch Bedingung 1α (Unabhängigkeit von der Temperatur) beschränkt. Ihr genügen in ausreichendem Maße nur einige Legierungen, deren spezifische Widerstände und Temperaturkoeffizienten folgende Tabelle enthält:

Tabelle IV.

Name	Hauptbestandteile	$10^4\sigma$	$10^3\alpha$	Thermokraft gegen Cu in 10^{-6} Volt/Grad
Mangankupfer	Cu mit 12,3% Mn	0,43	0,00	?
Patentnickel	75 Cu + 25 Ni	0,33	0,2	35
Konstantan	60 Cu + 40 Ni	0,48	—0,03 bis +0,05	40
Manganin	84 Cu + 12 Mn + 4Ni	0,36—0,46	—0,003 bis +0,01	1,5
Neusilber (Rheotan, Nickelin)	Cu, Ni, Sn	0,36—0,47	+0,07 bis 0,23	15
Kruppin	Fe, Ni	0,85—0,86	0,7	?

Aber auch von diesen Legierungen scheidet für sehr genaue Widerstände der größte Teil aus wegen Bedingung 2 α; denn, wie Kolumne 5 zeigt, besitzen alle diese Legierungen eine beträchtliche Thermokraft gegen Cu, mit alleiniger Ausnahme des Manganins. Aus diesem Grunde verwendet man für sehr genaue Widerstände fast ausschließlich Manganin.

Alle Widerstände zeigen die Erscheinung des Alterns: ihr Widerstandsbetrag ändert sich nach der Herstellung allmählich; die Aenderung kann mehrere Prozente betragen, sie wird hervorgerufen durch Strukturänderungen des Materials. Man beseitigt diese Inkonstanz, indem man die Widerstände nach Fertigstellung längere Zeit auf ca. 140° erhitzt (künstliches Altern). Außerdem kann, namentlich bei Manganinwiderständen, eine geringfügige Aenderung durch langsame Oxydation eintreten; man vermeidet sie durch einen Schellacküberzug. Letzterer kann, wie es scheint, einen Einfluß der Luftfeuchtigkeit auf den Widerstandsbetrag hervorrufen, indem in feuchter Luft der Schellack aufquillt und dadurch den Draht streckt. Man vermeidet diese Fehlerquelle durch Paraffinieren des mit Schellack überzogenen Drahtes.

1c) Ausführungsformen. 1. Die eigentlichen Widerstandskörper. α) Präzisionswiderstände. Für sehr genaue Präzisionswiderstände von größerem Betrage (von 0,1 Ω an aufwärts) wird heute fast ausschließlich die Ausführungsform der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt verwendet: das Widerstandsmaterial ist doppelt mit Seide umsponnener Manganindraht; er wird auf ein (meist mit Seide) isoliertes dünnwandiges Metallrohr aufgewickelt, schellackiert und im Trockenschrank 10 Stunden lang auf 140° erhitzt.

Wenn der Strom alle Windungen der Rolle im gleichen Sinne durchfließen würde, so würde er ein beträchtliches Magnetfeld erzeugen, das einerseits durch Beeinflussung anderer Apparate, andererseits durch die damit verbundene Selbstinduktion stören würde. Man läßt deshalb den Strom ebenso viele Windungen im einen wie im anderen Sinne durchfließen. Das wird erreicht durch bifilare Wickelung: man wickelt zwei Drähte miteinander auf und schickt den Strom durch den einen hin, durch den anderen zurück. Solche Widerstandsrollen von größerem Betrage besitzen aber eine große elektrostatische Kapazität, weil große Drahtlängen, die eine relativ hohe Spannung gegeneinander haben, dicht nebeneinander liegen. Viel geringere Kapazität besitzen die Rollen mit unifilar abwechselnder Wickelung (nach Chaperon). Bei ihnen werden die einzelnen Lagen unifilar, aber abwechselnd in entgegengesetzter Richtung

Digitized by Google

gewickelt, so daß auch wieder ebenso viele Windungen in der einen wie in der anderen Richtung vom Strom durchflossen werden, aber die Spannung zwischen benachbarten Drähten nur gering ist. In neuester Zeit ist von Ruhstrat eine Wickelungsart angegeben worden, die der Chaperonwickelung noch überlegen erscheint, die Kreuzwickelung: Man wickelt zwei Lagen in entgegengesetztem Sinne, schaltet sie aber nicht in Serie, wie bei der bifilaren und der Chaperonwicklung, sondern parallel. Damit die beiden Lagen einander genau gleichwertig sind, wickelt man sie auf einen Zylinder oder ein Rohr, dessen Querschnitt nach Figur 13

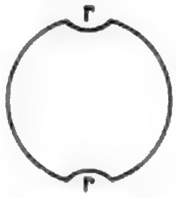


Fig. 13.

geformt ist: auf dem größten Teile des Zylinderumfanges liegen die Drähte der beiden Lagen nebeneinander, nur in den beiden Rillen rr, wo sie sich kreuzen, liegen sie übereinander.

Präzisionswiderstände von kleinerem Betrage stellt man, um günstigere Abkühlungsverhältnisse zu schaffen, aus Blechstreifen her, die frei ausgespannt sind.

β) Induktions- und kapazitätsfreie Widerstände. Bei sehr hohen Anforderungen an Induktions- und Kapazitätsfreiheit genügt die vorbeschriebene Ausführungsform (abgesehen von der Ruhstratschen Kreuzwickelung, über die noch keine Erfahrungen vorliegen) nicht mehr. Man verwendet dann verschiedene andere Formen, die allerdings in bezug auf Konstanz den ersteren z. T. erheblich unterlegen sind:

Nach Feußner erhält man praktisch induktions- und kapazitätsfreie Widerstände, indem man Bänder aus Manganin, Konstantan oder Nickelin auf dünne Glimmerscheiben von ca. 5 cm Breite aufwickelt; dann fließt der Strom auf beiden Seiten der Scheibe in entgegengesetzter Richtung; wegen der geringen Dicke der Scheibe liegen also stets entgegengesetzt durchströmte Leiter dicht nebeneinander, so daß ihre Magnetfelder sich gegenseitig aufheben. Diese Widerstände zeichnen sich außerdem, wegen der großen Oberfläche der Bänder, durch hohe Belastbarkeit aus; sie zeigen aber, wohl wegen der scharfen Knicke an den Ecken, in besonders hohem Maße die Erscheinung des Alterns.

Für sehr große Beträge sind die Kundtschen Widerstände geeignet; sie bestehen aus einer Platin-Gold-Legierung, die in sehr dünner Schicht außen auf ein Porzellanrohr eingebrannt wird, meist in Form einer Spirallinie. Ein Nachteil dieser Widerstände ist ihr relativ hoher Temperaturkoeffizient (0,0006 bis 0,0007), der besonders deshalb stört, weil die Widerstände sich wegen des geringen Wärmeleitvermögens des Porzellans schon bei geringen Stromstärken ziemlich stark erwärmen.

Eine im Verhältnis zu ihrem Widerstande beträchtliche Selbstinduktion besitzen insbesondere Widerstände von geringem Betrage (von 0,1 Ω abwärts); für Wechselstrommessungen lassen sich daher die unten beschriebenen Normalwiderstände unter 0,1 Ω nicht verwenden. Praktisch induktionsfreie Präzisionswiderstände von geringem Betrage (0,03 bis herab zu 0,001 Ω) sind von Orlich angegeben worden; er verwendet sehr dünnes Manganinblech, Hin- und Rückführung sind, nur durch eine dünne Glimmerscheibe getrennt, bis zu den Klemmen ganz dicht nebeneinander geführt. Solche Widerstände besitzen eine nicht unbeträchtliche Kapazität; das ist aber günstig, weil durch sie die Wirkung der Selbstinduktion kompensiert werden kann; der hierzu nötige Betrag der Kapazität ist unabhängig von der Frequenz des Wechselstromes. Die Orlichschen Widerstände sind so berechnet, daß ihre Kapazität gerade diesen günstigen Betrag besitzt; übrigens hat Orlich diesen Gedanken auch bei der Konstruktion von Widerständen höheren Betrages verwendet.

2. Zuleitungen und Schaltvorrichtungen. α) Einzelwiderstände. Einzelwiderstände werden fast ausschließlich als Normalwiderstände ausgeführt; sie dienen zu genauen Widerstandsvergleichungen und anderen Messungen, speziell zu Strommessungen durch Kompensation. Bei den Modellen der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt (Ausführung von Wolff) dienen als Zuleitungen starke Kupferbügel (Fig. 14); Klemmen werden gewöhnlich nicht angebracht, vielmehr werden die Widerstände in Quecksilbernäpfe eingehängt. Bei sehr genauen Messungen werden sie zwecks Konstanthaltung der Temperatur (Kühlung) in ein Petroleumbad gehängt. Figur 14 zeigt die Ausführung eines solchen Widerstandes, wie er für Beträge von 1, 10, 100, 1000 oder 10000 Ω ausgeführt wird.

Für Widerstände von 0,1 Ω abwärts ist die Ausführung nach Figur 14 nicht angängig, weil bei so kleinen Beträgen der Widerstand der Zuleitungsbügel und der Uebergangswiderstand im Quecksilber nicht mehr zu vernachlässigen ist. Solchen Widerständen gibt man deshalb besondere Ab-

zweigklemmen (Spannungsklemmen, vgl. auch S. 329), wie sie der in Figur 15 abgebildete Wolffsche Normalwiderstand von $^1/_{10000}$ Ω zeigt (PP). Sie führen direkt zu den Stellen, an denen das Manganinblech an die Kupferbügel s angeschlossen ist. Der Widerstandsbetrag solcher „Vierklemmenwiderstände" ist defi-

Fig. 14.

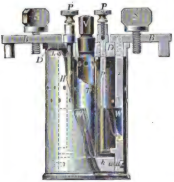


Fig. 15.

niert als Quotient der an den Klemmen PP herrschenden Spannung, dividiert durch den durch die Bügel B bezw. die Klemmen S zugeführten Strom (der Widerstandsbetrag ist übrigens, wie Helmholtz gezeigt hat, genau der gleiche, wie wenn man den Strom durch PP zuführt und die Spannung an SS bezw. BB mißt).

Normalwiderstände werden gebaut für Ströme bis zu ca. 15000 Ampere; diese großen Modelle sind meist in einem mit Petroleum gefüllten Gefäße fest montiert, das Petroleum wird durch strömendes Wasser gekühlt. Der Widerstandsbetrag der Normalwiderstände stimmt mit dem Sollwerte auf etwa $^1/_{10000}$ überein.

Außer als Normalwiderstände werden Einzelwiderstände zu Meßzwecken nur als Zubehör zu Meßinstrumenten, nämlich als Vorschaltwiderstände für Spannungsmesser oder Nebenschlußwiderstände (Shunts) für Strommesser ausgeführt. Letztere versieht man, da ihr Widerstandsbetrag stets klein ist, immer mit besonderen Abzweigklemmen zum Anschluß des Meßinstrumentes.

Meßwiderstände von sehr hohem Betrage (10^{10} Ω) stellt man nach Bronson durch Luftstrecken her, die durch ein schwach radioaktives Präparat leitend gemacht werden. Auch Flüssigkeitswiderstände (Kapillaren, gefüllt mit einer Mischung von Xylol und Alkohol) finden Verwendung, haben aber den Nachteil eines großen Temperaturkoeffizienten.

β) Widerstandssätze. Um in einen Stromkreis bequem einen Widerstand beliebigen Betrages einschalten zu können, vereinigt man mehrere Einzelwiderstände zu einem Widerstandssatz oder Widerstandskasten, der eine besondere Einrichtung enthält, um jeden einzelnen Teilwiderstand bequem in den Stromkreis ein- und ausschalten zu können. Am gebräuchlichsten sind Stöpselwiderstände in Serienschaltung; einen solchen Widerstandskasten stellt Figur 16 von der Seite gesehen (Schutzkasten abgenommen), Figur 17 von oben gesehen dar. Bei dieser Anordnung sind sämtliche vorhandenen Widerstände in Serie geschaltet und zu den Anschlußklemmen geführt; zwischen je zwei Widerständen sind Messingklötze eingeschaltet, die auf den Kastendeckel (aus Hartgummi) aufgeschraubt oder in ihn einvulkanisiert sind. Durch konische Messingstöpsel, die in Ausbohrungen der Messingklötze eingesteckt werden, können zwei benachbarte Klötze direkt miteinander verbunden werden, wodurch der zwischen ihnen liegende Teilwiderstand kurzgeschlossen, d. h. aus dem Stromkreise ausgeschaltet wird. Die Teilwiderstände sind nach Art eines Gewichtssatzes angeordnet; man hat in jeder Dekade entweder die Beträge 1, 2, 2, 5 (bezw., wie in Figur 17 1, 1, 2, 5; die Summe wird durch die nächst niedrigere Dekade zu 10 ergänzt) oder 1, 2, 3, 4. So kann man z. B. bei dem in Figur 17 abgebildeten, aus 25 Rollen bestehenden Widerstandskasten zwischen die Anschlußklemmen (links) jeden beliebigen Widerstandsbetrag zwischen 0,1 und 100000 Ω in Abstufungen von 0,1 Ω legen. Die in Figur 16 sichtbaren längeren Stöpsel sind mit Klemmen versehen; sie gestatten über einem Teil des eingeschalteten Widerstandes eine Leitung abzuzweigen.

Digitized by Google

Wichtig ist bei solchen **Widerstandskästen**, daß die Stöpsel eine praktisch **widerstandsfreie** Verbindung zwischen den **Messingklötzen** herstellen. Der Widerstand eines durch auf den Klötzen schleifende Federn hergestellt, die an einer um die Achse A drehbaren Kurbel sitzen. Bei solchen Kurbelrheostaten darf die Stromzuführung zur

Fig. 16.

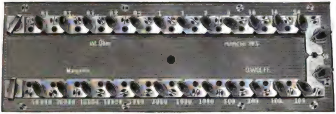


Fig. 17.

guten Stöpsels bleibt bei richtiger Behandlung unter $^1/_{10000}\ \Omega$ und kann bei Anwendung einiger Sorgfalt auf etwa $^1/_{20000}\ \Omega$ gehalten werden.

Um auch diese geringen Uebergangswiderstände möglichst zu vermeiden, verwendet man eine andere Anordnung der Widerstände, die sogenannte **Dekadenschaltung**. Bei ihr besteht jede Dekade aus 9 oder 10 hintereinander geschalteten gleichen Widerständen; zwischen je zweien ist, wie bei den Serienwiderständen, ein Messingklotz eingeschaltet, der durch einen Stöpsel direkt mit der einen der beiden Anschlußklemmen verbunden werden kann; die andere Klemme ist dauernd mit dem Anfang des ersten Widerstandes verbunden. Auf diese Weise kommt man in jeder Dekade mit nur einem Stöpsel aus. Figur 18 zeigt einen solchen Widerstand (Siemens).

Ebenso wie die Stöpselwiderstände sind die Kurbelwiderstände in Dekadenschaltung geschaltet. Figur 19 zeigt das Schema eines solchen: Hier wird die Verbindung der Messingklötze m mit der einen Hauptklemme Kurbel nicht durch die Achse erfolgen (schlechter Kontakt); man läßt daher entweder das andere Ende der Kurbel auf einem Messingbogen b schleifen, wie in Figur 19 gezeichnet, oder führt den Strom der Kurbel durch eine elastische Kupfer-

Fig. 18.

Digitized by Google

bandspirale S zu, wie sie in Figur 19 gestrichelt gezeichnet ist. Solche Kurbelwiderstände sind in der Handhabung wesentlich bequemer als die Stöpselwiderstände: sie haben dafür den Nachteil eines höheren Uebergangswiderstandes an den Kurbelkontakten, nämlich etwa $^2/_{10000}$ Ω bei sorgfältiger Behandlung.

Figur 20 zeigt einen aus 3 Dekaden bestehenden Präzisionskurbelwiderstand von Wolff, Figur 21 einen Kurbelwiderstand für höhere Belastung (Hartmann & Braun), der weniger genau abgeglichen ist; bei ihm sind als Einzelwiderstände die oben unter 1 c 1 β beschriebenen Feußnerschen „Band auf Glimmer"-Elemente verwendet.

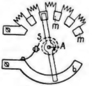


Fig. 19.

Fig. 20.

Zuweilen findet man auch Widerstandskästen mit ganz abweichender Schaltung, die zur Messung von Leitfähigkeiten dienen. Die Einzelwiderstände werden durch Stöpsel einander parallel geschaltet; sie sind nach Leitfähigkeiten bezeichnet, so daß die Leitfähigkeit des zwischen den Hauptklemmen liegenden Gesamtwiderstandes gleich der Summe der Leitfähigkeiten der eingeschalteten Widerstände ist (Thomson, Hausrath.)

Schließlich gibt es noch Meßwiderstände für besondere Zwecke. Hierher gehören die fertigen „Präzisionsmeßbrücken", Brücken- oder Gefälldrähte, Walzenbrücken, die oben unter I 3 a 4 angeführt wurden. Außerdem sind noch im Handel Verzweigungswiderstände, das sind zwei in Serie geschaltete Widerstände oder Widerstandsreihen, die an Stelle des Brückendrahtes (R_3 und R_4 in Figur 3) in der Wheatstoneschen Brücke dienen und somit einen Widerstandskasten zu einer vollständigen Brückenanordnung ergänzen sollen; ferner Nebenschlußwiderstände zur Reduktion der Galvanometerempfindlichkeit. Endlich wären hier die Kompensationsapparate anzuführen, die oben schon erwähnt wurden; ihre Beschreibung findet sich im Artikel „Elektrische Spannung".

1d) Belastbarkeit. Die von einem Leiter von der freien Oberfläche O und der Temperaturerhöhung über die Umgebung T abgegebene Wärme, die im stationären Zustande gleich der zugeführten Wärme J^2W sein muß, ist

$$Q = C_1OT = J^2W \qquad (21)$$

(Newtonsches Abkühlungsgesetz, vgl. auch oben I 4 b 2); die Konstante C_1 hat etwa den Betrag 0,005 Watt/qcm Grad. Die Grenze der zulässigen Belastung ergibt sich daraus, daß die Temperaturerhöhung T einen bestimmten Wert nicht überschreiten darf; da bei Widerständen gleicher Ausführung (aber verschiedenen Betrages) die Oberfläche (z. B. die Oberfläche des Metallrohres bei Normalwiderständen, die der Glimmerplatte

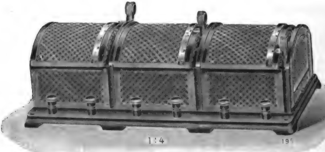


Fig. 21.

Digitized by Google

bei der Feußnerschen Form) die gleiche ist, kommt heraus, daß ein bestimmtes Modell nur mit einer bestimmten Höchstleistung beschickt werden darf. Die Höchstleistung richtet sich nach dem Verwendungszweck der Widerstände; Normalwiderstände, deren Betrag auf $^1/_{10000}$ richtig bleiben soll, vertragen eine viel geringere Temperaturerhöhung und dementsprechend auch eine viel geringere Belastung als Widerstände der gleichen Ausführung, die zu technischen Messungen dienen sollen, bei denen etwa eine Genauigkeit von ½ Promille reichlich genügt. Nachstehend sind die zulässigen Höchstbelastungen für einige Widerstände zusammengestellt:

Tabelle V.

	Höchstleistung (Watt)	Höchststrom in Ampere bei 1	10	100 Ω
Normalwiderstände (Wolff) für Präzisionsmessungen (Fig. 14)	1	1	0,3	0,1
Dieselben für technische Messungen	10	3	1	0,3
Stöpselwiderstandskästen (Fig. 16 u. 17)	1—2 pro Dekade	1,2	0,4	0,12
Kurbelrheostate (Hartmann u. Braun) mit Feußnerschen Glimmerwiderständen (Fig. 21)	100 pro Dekade	10	3	1

2. Regulier- und Belastungswiderstände (Ballastwiderstände). Hierunter wollen wir solche Widerstände verstehen, die entweder nach I 4a zum Regulieren des Stromes in Gebrauchsapparaten, oder auch (z. B. bei Untersuchungen von Generatoren) zur Hervorbringung einer bestimmten Belastung bei einem Generator dienen sollen; ihr Widerstandsbetrag braucht im allgemeinen nur der Größenordnung nach bekannt zu sein, meist wird aber verlangt, daß sie veränderlich sind, so daß man innerhalb gewisser Grenzen jeden beliebigen Widerstandsbetrag einstellen kann.

2a) Anforderungen. Die Anforderungen, die man an solche Widerstände stellt, sind ganz andere, als die oben für Meßwiderstände aufgestellten. Auf Genauigkeit und Konstanz kommt es hier erst in allerletzter Linie an, die wichtigste Forderung ist hier diejenige einer großen Belastbarkeit.

2b) Material. Aus diesem Grunde ist man in der Wahl des Materials jetzt weit weniger beschränkt als oben; zwar verwendet man vielfach die Speziallegierungen, die oben in Tabelle IV zusammengestellt sind (abgesehen von Manganin), hauptsächlich wohl wegen ihres hohen spezifischen Widerstandes; daneben finden aber auch noch andere Stoffe, z. B. Nickel, Eisen, Kupfer, Kohle, auch Salzlösungen, Verwendung. Auch Siliziumverbindungen (Silit, Silundum), wie sie für Heizwiderstände gebraucht werden, sind geeignet.

2c) Belastbarkeit. Für Widerstände für Dauerbelastung sind im großen und ganzen dieselben Gesichtspunkte maßgebend wie für Meßwiderstände, nur ist hier die zulässige Höchsttemperatur allein durch die Haltbarkeit des Materials (Oxydation, Formänderung, Schmelzpunkt) bestimmt; man geht unter Umständen bis zur Glühtemperatur. Für frei ausgespannte Drähte oder Blechstreifen ist folgende Beziehung bequem, die man erhält, wenn man in Gl. (21)

$$W = \frac{l}{q} . \sigma \text{ und } O = u . l$$

(u ist der Umfang des Leiterquerschnitts) setzt:

$$T = \frac{J^2}{q . u} . C_2 \qquad (22)$$

(Kohlrausch). Die Konstante C_2 ist gleich $\frac{\sigma}{C_1}$; sie hat für die gebräuchlichsten Materialien, wenn man q in mm², u in mm ausdrückt, folgende Beträge: bei Cu 0,35, Fe 2, Neusilber 6, Konstantan oder Manganin 10.

Vielfach kommt es bei Widerständen aber gar nicht auf die Belastung an, welche sie dauernd ertragen können, sondern auf die Energie, die sie für kurze Zeit aufnehmen können (z. B. bei Anlaßwiderständen für Motore); bei solchen Widerständen ist

Digitized by Google

eine große Wärmekapazität günstig, es kommt also dann weniger auf die Oberfläche, als auf das Gewicht an. Die Wärmekapazität fester oder flüssiger Körper, die in inniger Berührung mit dem Widerstande sind, wird mit ausgenutzt. Für solche Zwecke sind daher Widerstände günstig, bei denen der Leiter auf schwereren Unterlagen (aus Metall, Porzellan, Schiefer) montiert oder in Isolationsmaterial eingebettet ist; auch setzt man die Widerstandsdrähte in Oel, namentlich bei Anlassern für Motore („Oelanlasser").

Die Temperaturerhöhung solcher Widerstände berechnet sich, wenn die während des Stromdurchgangs abgegebene Wärme vernachlässigt wird, nach:

$$J^2 W . t = K_e . T = K . T . 4{,}2$$

wenn K_e die Wärmekapazität des Widerstandes (einschließlich der umgebenden Körper) im Energiemaße (Wattsec/Grad), K dieselbe Größe in g Kal/Grad, t die Zeit in Sekunden darstellt; dabei ist

$$K = \Sigma\, c\, G,$$

worin c die spezifische Wärme, G das Gewicht (in Gramm) der einzelnen erwärmten Teile ist. Für frei in Luft ausgespannte runde Drähte vom Durchmesser d mm und spezifischen Gewicht s ergibt sich so die Temperaturerhöhung pro sec zu

$$\frac{T}{t} = 0{,}4 \frac{\sigma . 10^4}{cs} \frac{J^2}{d^4} = B . \frac{J^2}{d^4} \frac{\text{Grad}}{\text{sec}} \qquad (23)$$

Die Konstante B hat die Beträge: für Kupfer 0,008, für Eisen 0,06, für Konstantan, Manganin, Nickelin 0,15 (Kohlrausch).

2d) Ausführungsformen. 1. Einzelwiderstände. Einzelwiderstände werden entweder für sich allein (als feste Vorschaltwiderstände, z. B. für Bogenlampen, Motorwickelungen) oder als Widerstandselemente für die weiter unten besprochenen Kurbelrheostaten verwendet. Am verbreitetsten ist die Form der Drahtspiralen, die aus blankem Draht von kreisförmigem Querschnitt gewunden werden. Sie werden meist frei in der Luft ausgespannt, wobei sie ihre Form infolge ihrer eigenen Federkraft behalten; zwecks Kühlung werden sie vielfach in Oel oder Petroleum, auch wohl in fließendem Wasser untergebracht. Bei den v. Brockdorffschen Widerständen ist die Spirale aus Band gewunden und nach Art eines Metallschlauches zu einem biegsamen Rohr ausgebildet, durch das man das Kühlwasser fließen läßt. Ein solches Rohr kann bei 1 m Länge und 1 cm Durchmesser die beträchtliche Energie von 15 KW aufnehmen.

Bei einer zweiten ebenfalls sehr verbreiteten Form von Widerständen wird der Widerstandsdraht auf einen besonderen Träger aufgewickelt; als Träger werden verwendet Porzellanrohre, Metallrohre, die mit einem isolierenden Ueberzug, z. B. Emaille, versehen sind, oder Prismen aus Schiefer von rechteckigem oder kreuzförmigem Querschnitt; auch Platten aus Glimmer (ähnlich wie bei den oben angeführten Feußnerschen Widerständen), Mikanit oder Asbestschiefer werden, namentlich für höhere Widerstandsbeträge, verwendet. In diesem Falle wird der Draht gewöhnlich durch Seide isoliert; sonst wird meist blanker Draht in eine in den Träger eingeritzte Rille gewickelt, die den Windungen einen hinreichenden Abstand gibt. Bei den Ruhstratschen Widerständen wird der Draht vor dem Wickeln durch Glühen mit einer isolierenden Oxydschicht versehen und dann dicht gewickelt.

Solche Widerstände lassen sich durch Anwendung bifilarer Wirkung oder der oben erwähnten Kreuzwickelung auch induktionsfrei herstellen.

Eine andere Form von Widerstandselementen sind die Schniewindtschen Asbestgitterwiderstände (Fig. 22); bei ihnen

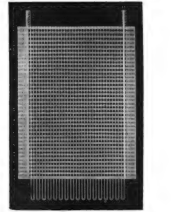


Fig. 22.

ist Widerstandsdraht oder -Band mit Asbestschnüren nach Art eines Gewebes verflochten; der Widerstandsdraht ist nach Art des Einschlages im Zickzack hin und her geführt. Solche Widerstände vertragen sehr hohe Temperaturen, also auch relativ hohe Belastung.

Für starke Ströme, z. B. als Anlaßwiderstände für große Motore, werden die Widerstandselemente vielfach aus glatten oder gewellten Blechstreifen hergestellt; auch gußeiserne Widerstandselemente, die in Form einer flachen Spirale oder eines zickzack-

Digitized by Google

förmig hin und her geführten Bandes gegossen werden, finden Anwendung.

Einerseits um die bei höherer Temperatur eintretende Oxydation des Widerstandsmaterials zu vermeiden, andererseits um dem Widerstandselement eine große Wärmekapazität (s. oben) zu geben, sind eine Reihe von Konstruktionen angegeben worden, bei denen der Leiter ganz in Isolationsmaterial eingebettet ist. Man bringt z. B. eine Widerstandsspirale in einem Metallrohr unter, das dann mit Zement oder Chamotte ausgefüllt wird; oder der Widerstand wird in Form eines im Zickzack hin und her geführten Bandes auf eine emaillierte Metallplatte gelegt und mit dieser zusammen mit einer zweiten Emailleschicht überzogen.

Sehr geeignet als Belastungs- und Regulierwiderstände sind schließlich auch Glühlampen, sowie die weiter unten aufgeführten Heizwiderstände; von ihnen kommen hauptsächlich die Prometheus-, Silundum- und Kryptolwiderstände in Betracht.

Von Widerständen für Spezialzwecke seien erwähnt: die oben angeführten Eisenwiderstände in verdünntem Wasserstoff, deren Widerstand so stark mit dem Strome zunimmt, daß innerhalb gewisser Grenzen der von ihnen aufgenommene Strom unabhängig von der Klemmenspannung ist; sie werden zur Konstanthaltung des Stromes bei stark schwankender Spannung verwendet; ferner Widerstände von sehr hoher Ohmzahl (1 Megohm und höher); für diesen Zweck sind Graphitwiderstände im Gebrauch, sie werden hergestellt, indem man ein Tonrohr mit einem feinen Graphitüberzug versieht; die einfachste Form eines solchen Widerstandes ist ein Bleistiftstrich auf einer mattierten Glasplatte (Phillips); auch ein Tuschestrich auf Zeichenpapier (Aust) genügt für manche Zwecke. Man erzielt so Widerstände von 1 bis 20000 Megohm.

2. **Regulierbare Widerstände.** *a*) **Kurbelrheostaten.** Aus den vorbeschriebenen Einzelwiderständen werden in der Weise, wie es bei den Meßwiderständen auseinandergesetzt wurde, veränderliche Widerstände zusammengesetzt. Praktisch kommt nur die Kurbelschaltung in Betracht, und zwar schaltet man normalerweise, genau wie bei den Meßwiderständen, die Einzelwiderstände in Serie und schließt die Verbindungsstellen an die Kurbelkontakte an; die eine Zuführungsklemme ist mit der Kurbel, die andere mit einem Ende der Widerstandsreihe verbunden, wie in Figur 19. Bisweilen wird das andere Ende der Widerstandsreihe zu einer dritten Klemme geführt, um die Abzweigschaltung Figur 10a zu ermöglichen. Figur 23a zeigt einen solchen Widerstand. Gewöhnlich werden die Teilwiderstände (die Widerstandsstufen) nicht einander gleich gemacht, sondern so gewählt, daß in dem Maße, wie der Strom bei allmählicher Ausschaltung der Widerstände wächst, die Stufen kleiner werden, etwa so, daß jeder Stufe die gleiche prozentuale Stromänderung entspricht; gleichzeitig werden diese Stufen, dem höheren Strome entsprechend, aus Leitern von größerem Querschnitt gebildet.

Ist die Spannung, die an dem Widerstande auftritt, nahezu konstant, z. B. bei Vorschaltwiderständen für Bogenlampen oder

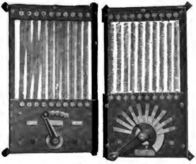


Fig. 23 a. b.

Belastungswiderständen für die Untersuchung von Dynamomaschinen, so ist es zweckmäßiger, die Abstufung durch Parallelschaltung gleicher Einzelwiderstände zu erzielen. Einen so eingerichteten Kurbelrheostaten zeigt Figur 23b; hierbei sind sämtliche Teilwiderstände mit einem Ende direkt an die eine Hauptklemme angeschlossen, die anderen Enden führen zu den federnden Kontaktstücken, von denen eine beliebige Zahl mittels des halbkreisförmigen Messerkontaktes mit der anderen Hauptklemme verbunden werden kann. Diese Widerstände haben den Vorzug, daß bei Einstellung des kleinsten Widerstandswertes, also des größten Stromes und damit der größten Leistung im Widerstande, sämtliche Teilwiderstände ausgenutzt werden.

Für die Regulierung sehr starker Ströme verwendet man statt der Kurbel eine Schaltwalze (Kontroller). Hierbei sind die Verbindungsstellen der einzelnen Widerstandsstufen sowie die Stromzuführungen zu Bürsten geführt, die auf verschieden langen, miteinander verbundenen Segmenten einer drehbaren Walze schleifen; durch Drehen der

Digitized by Google

Walze werden die Widerstände, ebenso wie bei einer Kurbel, sukzessive eingeschaltet.

β) Schieberwiderstände. Bei den oben beschriebenen Drahtwiderständen auf Porzellan, Schiefer oder Metallrohr geschieht die Stromzuführung häufig, anstatt durch das Ende des aufgewickelten Drahtes, durch einen zweiteiligen Metallring, der an irgendeiner Stelle auf die Wickelung aufgeklemmt wird. Man kann so verschiedene Widerstandsbeträge einstellen. Weiter ausgeführt ist dieser Gedanke bei den Schieberwiderständen, bei denen die Stromzuführung durch auf der Drahtwickelung schleifende Federn bewirkt wird, die längs der Wickelung auf einer Stange verschiebbar sind; die Widerstände sind meist mit drei Klemmen (für Abzweigschaltung) versehen. Diese Widerstände ermöglichen eine äußerst feine, fast stetige Stromregulierung; sie werden namentlich als Laboratoriumswiderstände sehr viel verwendet. Figur 24 a bis c zeigen einige Ausführungsformen solcher Widerstände (Ruhstrat); Figur 24a stellt einen Schieferwiderstand, Figur 24b einen Emailrohrwiderstand, der vertikal aufgestellt ist, um durch Kaminwirkung gute Kühlung zu erzielen, dar; bei dem Widerstand Figur 24c ist eine Drahtspirale auf Schiefer gewickelt.

a

b

c

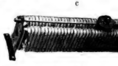


Fig. 24 a—c.

γ) Flüssigkeitswiderstände. Die Aufgabe, einen veränderlichen Widerstand herzustellen, läßt sich in einfacher Weise lösen, wenn man als Leiter eine Flüssigkeit verwendet (meist Kupfersulfatlösung mit Kupferelektroden, Soda- oder Pottaschelösung mit Eisenelektroden). Die Veränderung solcher Widerstände geschieht durch Veränderung der Elektrodenentfernung oder der Elektrodenfläche; bei Starkstromwiderständen verwendet man fast stets das letztere Verfahren, indem man die Elektroden mehr oder weniger tief in die Flüssigkeit eintauchen läßt. Im Laboratorium sind Flüssigkeitswiderstände sehr wertvoll bei Arbeiten mit Hochspannung; man verwendet hierbei als Flüssigkeit eine Lösung von Jodkadmium in Amylalkohol, die einen sehr hohen spezifischen Widerstand ($\sigma =$ ca. $3.10^4 \ \Omega$ cm) besitzt; als Gefäß nimmt man gewöhnlich vertikale Glasröhren; verändert wird der Widerstand durch Veränderung der Entfernung der aus Kadmiummetall bestehenden Elektroden. Man kann so leicht Widerstände von mehreren Megohm herstellen.

3. Heizwiderstände. Heizwiderstände werden im wesentlichen gebraucht für elektrische Heizkörper für Wohnräume und für Kochgefäße usw. Für den ersteren Zweck werden meist dieselben Widerstandselemente benutzt, wie die im vorigen Abschnitt (unter **2** d 1) beschriebenen; insbesondere frei ausgespannte Spiralen, auf Rohre gewickelte Widerstände, Asbestgitter und die im Isoliermaterial eingebetteten Widerstände. Für Kochgefäße, Plätteisen usw. sind nur Widerstände geeignet, die bei gegebener Leistungsaufnahme möglichst wenig Raum beanspruchen; abgesehen von Spezialkonstruktionen werden hierzu Asbestgitterwiderstände und eingebettete Widerstände benutzt. Von Spezialanordnungen ist die verbreitetste das System „Prometheus"; hierbei sind als Heizwiderstände dünne Glimmerfolien verwendet, die auf chemischem Wege mit einem dünnen Platinüberzug versehen werden. Für Kochherde und Heizplatten, welche eine wesentlich höhere Temperatur erzeugen müssen, werden entweder eingebettete Widerstände verwendet, oder man stellt die Widerstände aus Silundum, einer Silicium-Kohlenstoffverbindung her, die einen sehr hohen spezifischen Widerstand besitzt und Temperaturen bis 1800^0 ohne Veränderung aushält.

Ein für verschiedene Heizzwecke sehr geeignetes Material ist das Kryptol, eine aus lose aufeinander geschichteten Graphitkörnern bestehende Masse, welche wegen der großen Uebergangswiderstände zwischen den Körnern einen hohen spezifischen Widerstand besitzt. Die Stromzuführung geschieht durch Elektroden aus Kohle oder Graphit. Kryptol wird entweder in Form von Einzelwiderständen (Kryptolpatronen, d. h. mit Kryptol gefüllten Glasröhren verwendet, oder

Digitized by Google

die Kryptolmasse wird in einem Kasten aus Isoliermaterial lose aufgeschüttet und die zu erwärmenden Gegenstände (z. B. Kochflaschen, Abdampfschalen in chemischen Laboratorien) wie in ein Sandbad hineingestellt. Laboratoriumsöfen für hohe Temperaturen erhält man, indem man einen Tiegel mit Kryptolmasse umgibt.

Literatur. *Die betr. Kapitel in Winckelmanns Handbuch der Physik, 2. Aufl., Bd. IV, S. 232 bis 250 (**Auerbach**), S. 814 bis 883 (**Grätz**), S. 759 bis 761 (**Cantor**). Leipzig 1905.* — ***Maxwell**, Lehrbuch der Elektrizität und des Magnetismus, deutsch von **Weinstein**, Bd. I, S. 433 bis 442, 486 bis 523. Berlin 1883.* — ***Kohlrausch**, Lehrbuch der praktischen Physik, 11. Aufl., Leipzig 1910.* — *Handbuch der Elektrotechnik (herausg. v. **Heinke**), Bd. XI, 2: Elektrothermische Einrichtungen und Verfahren (bearbeitet von **Engelhardt**). Leipzig 1908.* — ***Uppenborn-Dettmar**, Kalender für Elektrotechniker. München 1912.* — ***H. Hausrath und F. Krüger**, Ueber Meßbrücken, Widerstände und Kompensationsapparate nebst Zubehör, wie Normalelemente und Telephone. Helios (Fachzeitschrift) 1909, S. 429ff.* — ***K. Fischer**, Technische Widerstände. Helios (Elektropraktiker) 1909, S. 229ff.* — ***Feussner und Lindeck**, Die elektrischen Normaldrahtwiderstände der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt, Zeitschr. f. Instr. 15, S. 394 und 425, 1895.* — ***Jäger**, Vergleichende Betrachtung über die Empfindlichkeit verschiedener Methoden der Widerstandsmessung. Zeitschr. f. Instr. 26, S. 69, 1906.* — ***Derselbe**, Ueber die Empfindlichkeit der Widerstandsthermometer. Zeitschr. f. Instr. 26, S. 278, 1906.*

H. Busch.

Elektrizität

siehe oben S. 193.

Elektrizitätsleitung.[1])

1. Elektrisches Feld im Innern von Leitern. Art der Elektrizitätsleitung. Leiter erster und zweiter Klasse. 2. Gesetz von Ohm. Charakteristik von Leitern und Stromsystemen. Gesetze von Kirchhoff. Leitung von Gleichstrom und Wechselstrom. 3. Gesetz von Joule. 4. Leitfähigkeit und Einfluß der Temperatur des Aggregatzustandes, der Modifikation: a) bei Metallen. b) bei Legierungen. c) bei Halbleitern. d) bei festen Elektrolyten. 5. Beziehungen zu anderen Gebieten der Physik: a) Gesetz von Wiedemann und Franz. b) Photoeffekte. c) Einfluß des Druckes. d) Leitfähigkeit der Dielektrika und Endosmose. 6. Die phänomenologische Theorie der Leitung. 7. Die Elektronentheorien der Elektrizitätsleitung.

Die Leitung der Elektrizität gibt uns Aufschluß über das Verhalten der Materie bei der Strömung von Elektrizität und lehrt daher vieles über die Struktur der Materie im ganzen wie in ihren kleinsten Teilen, den Atomen und den mit diesen mehr oder minder stark verbundenen Elektronen. Für den Praktiker ist die Leitung der Elektrizität in Metallen von größter Bedeutung; denn sie ist der Weg, Energie in großen Mengen am raschesten und mit geringstem Verlust auf weite Strecken fortzuleiten. Kein anderer uns bekannter Vorgang scheint dies Ziel mit gleicher Vollkommenheit zu erreichen.

1. Das elektrische Feld in Leitern. Art der Elektrizitätsleitung. Leiter erster und zweiter Klasse. Wenn zwei Stellen eines Isolators, die verschieden elektrisch geladen sind, also eine Differenz des elektrischen Potentials (der elektrischen Spannung, vgl. den Artikel „Elektrische Spannung") besitzen, so kann diese Differenz beliebig lange bestehen. Erfolgt dagegen ein Ausgleich des elektrischen Feldes oder, was dasselbe ist, der Spannungsdifferenz, so nennt man die Substanz einen Leiter. Je rascher der Ausgleich vor sich geht, um so besser leitet die Materie. Die reinen Metalle, namentlich Kupfer, Silber und Gold sind die vorzüglichsten Leiter. Eine Spannungsdifferenz von 1 Volt pro 1 cm kann sich in ihnen in weniger als $^1/_{1000}$ Sek. bis auf einen kaum meßbaren Bruchteil des ursprünglichen Wertes verringern. Will man in den Leitern eine Spannungsdifferenz aufrecht erhalten, so muß man eine dauernde elektromotorische Kraft erzeugen, also von einer Stromquelle, z. B. einem galvanischen Elemente aus, zwei Drähte an die betreffenden Stellen des Leiters anlegen. In dem Leiter findet dann ein ständiges Strömen von Elektrizität in dem Sinne statt, daß diese Strömung die Spannung herabzumindern sich bemüht. Es fließt dann nach dem positiv geladenen Teil des Leiters negative Elektrizität und verschwindet an dem negativ geladenen Teil. In Elektrolyten fließt gleichzeitig noch positive Elektrizität vom positiven nach dem negativen Pol. Früher, als man noch nicht sicher wußte, daß in festen metallischen Leitern nur die negative Elektrizität und in Ionenleitern positive und negative frei beweglich

---

[1]) Die Elektrizitätsleitung in Elektrolyten ist eingehend behandelt in den Artikeln „Elektrolytische Leitfähigkeit" und „Ionen", die Elektrizitätsleitung in Gasen in den Artikeln „Elektrizitätsleitung in Gasen", „Kathodenstrahlen", „Röntgenstrahlen", „Kanalstrahlen", „Anodenstrahlen", „Spitzenentladung", „Glimmentladung", „Lichtelektrische Erscheinungen", „Glühelektrische Erscheinungen", „Lichtbogenentladung" und „Funkenentladung".

sind, nahm man an, daß der Ausgleichungsvorgang durch positive Elektrizitätsmengen erfolge. Diese würden also von dem positiven Ende nach dem negativen Ende fließen, und man sagt daher noch jetzt nach allgemeiner Uebereinkunft: der elektrische Strom fließt vom positiven nach dem negativen Pol. Für alle Berechnungen ist es gleichgültig, welche Auffassung man zugrunde legt; man muß nur immer dieselbe Bezeichnung beibehalten.

Die Strömung der Elektrizitätsmenge in Leitern kann mit chemischer Materie und ohne diese erfolgen. Die Leiter, bei denen die Elektrizität in kleinsten Quanten (Elektronen) frei von Materie strömt, nennt man Leiter erster Klasse. Das sind alle festen Elemente, insbesondere die Metalle und einige Klassen von einheitlichen festen Verbindungen. E. Riecke hat 1901 durch sehr exakte Messungen festgestellt, daß bei Metallen kein nennenswerter Transport von Materie durch den elektrischen Strom stattfindet. Dasselbe wurde später an metallisch leitenden Verbindungen wie Bleiglanz beobachtet. Für diese Substanzen gilt dann das Spannungsgesetz von Volta. In wässerigen Lösungen z. B. von Salzen und in manchen festen Verbindungen wird, wie Ritter 1800 bei Stromdurchgang durch Wasser entdeckte, vom Strom Materie mitgeführt. In diesen Leitern zweiter Klasse ist nach Berzelius (1819) die Elektrizität an Atome oder Atomgruppen (Jonen) gebunden. Der Ausgleich von Spannungsdifferenzen ist viel langsamer, die Leitung daher schlechter als in den Metallen. Die Leitfähigkeit ist etwa ein Milliontel von der in Metallen. Die zum positiven Pol, der Anode, wandernden negativ geladenen Ionen heißen nach Faraday (1833) Anionen, die zur negativ geladenen Kathode wandernden positiven Ionen sind die Kationen. Die Metallatome der Salze sind Kationen; denn sie geben leicht negative Elektrizität ab und bleiben daher positiv geladen zurück. Als Kathode und Anode dienen in der Regel Metalle (Platin, Kupfer, Silber). Die elektrolytischen Leiter können also durch den Strom in zwei Teile getrennt werden; in einer Kupfersulfatlösung ($CuSO_4$) wandert das positiv geladene Kupfer (Cu) an die Kathode (Entdeckung der Galvanoplastik durch Jakobi 1837), das negative geladene Schwefelsäureion (SO_4) an die Anode. Das Kupfersulfat ist also elektrisch in zwei Teile aufgelöst oder elektrolysiert worden. Man nennt die Leiter zweiter Klasse daher auch Elektrolyten. Auf diesem Wege ist es gelungen, viele Substanzen zu zerlegen. So hat Davy 1807 aus feuchtem Aetzkali das Kaliummetall abscheiden können. Für den Stromdurchgang durch Elektrolyten hat M. Faraday 1833 aus Versuchen folgende Gesetze ableiten können: 1. Durch denselben Strom werden in gleicher Zeit äquivalente Mengen einer Substanz abgeschieden (äquivalente Menge gleich Atom- bezw. Molekulargewicht durch Valenz, also für Cu in $CuSO_4 = 63{,}2 : 2 = 31{,}6$ oder für Silber in Silbernitrat, Ag in $AgNO_3 = 107{,}6$). Da ein Ampère in 1 sec 1,118 mg Ag abscheidet, so werden unter denselben Bedingungen 0,3294 mg Cu aus $CuSO_4$ frei. 2. Die in der Zeiteinheit abgeschiedene Menge eines Ions ist der Stromstärke proportional, unabhängig von der Form der Elektrode, der Potentialdifferenz im Elektrolyten und anderen Bedingungen.

Gleichzeitig mit dem Transport der Ionen nach Kathode und Anode und durch ihn bedingt tritt eine elektromotorische Gegenkraft auf, die die angelegte Spannungsdifferenz vermindert und daher den Widerstand scheinbar erhöht. Diese Gegenkraft oder Polarisation ist jedoch kein hinreichendes Kennzeichen für elektrolytische Leitung. In schlechtleitenden metallischen Körpern kann eine Kombination von Peltierwärme und Thermokraft, die dort sehr erheblich ist, Polarisation vortäuschen. Um die Polarisation zu vermeiden und damit den wahren Wert des Widerstandes zu finden, verwendet man einen Strom, der so rasch wechselt, daß die Produkte der Elektrolyse nicht an der Kathode bezw. Anode ausgeschieden werden, sondern wegen ihrer geringen Menge noch in der umgebenden Lösung gelöst bleiben. Das ist der von F. Kohlrausch 1874 angegebene Weg, mit Telephon als Stromzeiger und Induktorium als Wechselstromquelle Widerstände von Elektrolyten genau zu messen. Die Theorie der elektrolytischen Leitung ist durch die Ueberlegungen und Beobachtungen namentlich von Clausius und Hittorf entwickelt worden. Ihre Beziehungen zu anderen Gebieten der Physik und Chemie haben Hittorf 1853 und namentlich Sv. Arrhenius 1884 und van't Hoff 1886 klargestellt und damit die physikalische Chemie (vgl. den Artikel „Chemie") begründet.

2. Gesetz von Ohm. Charakteristik von Leitern und Stromsystemen. Gesetze von Kirchhoff. Leitung von Gleichstrom und Wechselstrom. Die Grundlage der Lehre vom elektrischen Strom bildet das von G. S. Ohm 1826 aus Experimenten abgeleitete Gesetz: Die elektromotorische Kraft E ist proportional dem Widerstand W und der Stromstärke J ($E = JW$). Hierbei kann die elektromotorische Kraft E an zwei Punkten eines Drahtes entnommen

Digitized by Google

werden; man bezeichnet sie dann als Differenz des elektrischen Potentials, das also an den 2 Punkten verschiedene Werte hat. Die elektromotorische Kraft kann aber auch die Potentialdifferenz an beiden Polen einer stromliefernden Quelle (galvanisches Element, Dynamo usw.) sein, dann bezieht sich das Gesetz von Ohm auf den geschlossenen Stromkreis. Man mißt die elektromotorische Kraft z. B. mit Voltmetern. Die Stromstärke i, die gar nicht oder nur langsam veränderlich (stationär) sein soll, wird den magnetischen Wirkungen, der Feldstärke H, die sie erzeugt, proportional gesetzt; die exakte Beziehung hierfür ist durch das Gesetz von Biot und Savart gegeben. Man mißt die Stromstärke mit Ampèremeter. Der Widerstand w wird als unabhängig von Strom und Potential, als abhängig nur von der Beschaffenheit und dem Zustand der stromdurchflossenen Materie, dem sogenannten spezifischen Widerstand W_0, und von ihren Dimensionen, Länge l und Querschnitt q, angenommen: $W = W_0 \frac{l}{q}$ (vgl. den Artikel „Elektrischer Widerstand"). W_0 wird so definiert, daß das Gesetz von Ohm ohne Proportionalitätsfaktor geschrieben werden kann. Es ist dann der Widerstand einer Quecksilbersäule von 1,063 m Länge, 1 qmm Querschnitt bei 0° gleich 1 Ohm. — Bis jetzt hat sich das Gesetz von Ohm in allen homogenen Metallen und Halbleitern bis zu den höchsten erreichbaren Potentialdifferenzen und Stromstärken, wie die Versuche von Chrystal nach Vorschlag von Cl. Maxwell 1874 sowie von Gaugain und von Clark zeigten, als richtig erwiesen; doch läßt die Elektronentheorie ebenso wie die Ionentheorie voraussehen (J. Stark, 1901), daß die Gültigkeit keine absolute sein kann. Auch die Definition des Widerstandes scheint nach den Beobachtungen von Patterson und von K. Baedeker für kleinste Schichtdicken unter 50 $\mu\mu$ zu versagen. In einigen inhomogenen Halbleitern tritt, wie F. Braun 1874 gefunden hat, gleichzeitig mit dem Versagen des Gesetzes von Ohm eine Abhängigkeit des Widerstandes von der Stromrichtung (unipolare Leitung) auf. Zwischenschichten sind vermutlich die Ursachen dieses Verhaltens.

Im technischen Maßsystem wird das Gesetz von Ohm so ausgesprochen:

$$1 \text{ Volt} = 1 \text{ Ampere} \times 1 \text{ Ohm}$$

Also fließen durch einen Draht von 10 Ohm Widerstand, der einen Akkumulator von 2 Volt schließt, 0,2 Ampere Strom. Bezüglich der speziellen Meß- und Demonstrationsmethoden der Gesetze sei auf die am Schluß unter allgemeiner Literatur angegebenen Lehrbücher verwiesen.

Das Gesetz von Ohm ist also charakteristisch für elektrische Leitung in metallisch leitenden Substanzen und für Ionenleitung in festen Körpern und Flüssigkeiten. Die Charakteristik der elektrischen Leitfähigkeit ist eine Kurve in einem Koordinatensystem, dessen Abszisse die Stromstärke i, dessen Ordinate die Potentialdifferenz oder elektromotorische Kraft E an den 2 Punkten des zu untersuchenden Leiters sind. Für einen metallischen Leiter, der dem Gesetz von Ohm folgt, ist daher bei konstanter Temperatur die Charakteristik, welche W. Kaufmann 1900 und H. Th. Simon 1905 für das Studium der Elektrizitätsleitung ausgearbeitet haben, eine gerade Linie, für den Lichtbogen dagegen eine Kurve (vgl. Fig. 1). Es sei noch hinzugefügt, daß das Gesetz von Ohm auch un-

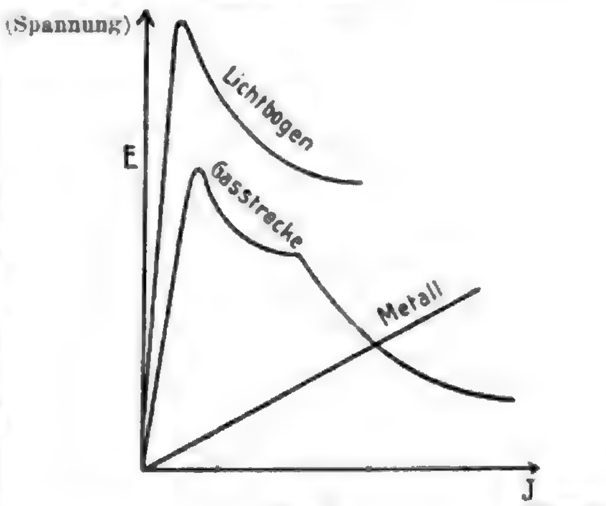


Fig. 1.

abhängig von der Zeitdauer und dem Wechsel der Stromrichtung gilt. Die Versuche von E. Cohn (1884) zeigten, daß in Elektrolyten selbst bis zu einer Wechselzahl von 25000 p. sec. das Gesetz von Ohm Giltigkeit besitzt. Scheinbare Ausnahmen sind durch das Auftreten der Polarisation bei den Elektrolyten, durch die Selbstinduktion usw. erklärt. Daher muß in festen Körpern bei konstanter Temperatur die Charakteristik für Gleichstrom (statische Ch.) wie für Wechselstrom (dynamische Ch.) eine gerade Linie sein. Abweichungen von dieser erlauben z. B. die Größe der elektrischen Polarisation oder der Selbstinduktion usw. zu berechnen.

Als Folgerungen aus dem Gesetze von Ohm kann man die von G. Kirchhoff 1847 aufgestellten Sätze über die Verzweigung von Strömen betrachten. Sie gelten ganz streng wie das Gesetz von Ohm nur für stationären Strom und haben zur Voraussetzung, daß sich an keiner Stelle Elektrizität anhäuft:

Digitized by Google

1. Die Summe der an einem Punkt ankommenden Ströme ist gleich der Summe der abfließenden Ströme, oder die Summe aller Ströme ist = 0. In Figur 2 Punkt G: $a = b + c$ und in A: $e = b + 0$.

2. Die Summe der Produkte von Stromstärke J und Widerstand W d. h. $\Sigma J.W$ in einem

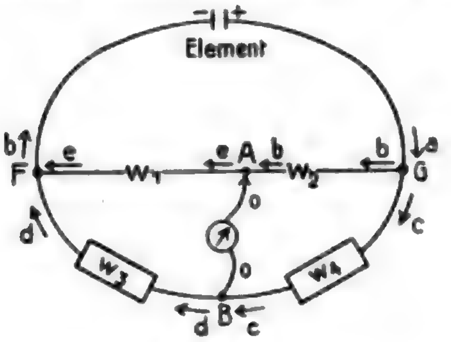


Fig. 2.

geschlossenen Stromkreis ist gleich der elektromotorischen Kraft der Stromquellen ΣE (galvanische Elemente usw.) in diesem Kreis.

3. Die Gesamtleitfähigkeit ist gleich der Summe der Einzelleitfähigkeiten. Hierbei kann die Leitfähigkeit als der reziproke Wert des Widerstandes definiert werden. Also:

$$\frac{1}{W'} = \Sigma \frac{1}{W}.$$

Machen wir hiervon eine Anwendung zur Ableitung der Formel für die Brückenschaltung nach Wheatstone (1843), die zur Vergleichung und damit zur Bestimmung von Widerständen dient. Falls das Galvanometer stromlos bleibt, so ist in A: $e - b + 0 = 0$ in B analog: $c = d$. Nach Satz 2 ist im Kreis ABF: $e.W_1 + d.W_3 + 0 = 0$ und im Kreis ABG: $bW_2 + cW_4 + 0 = 0$; denn $\Sigma E = 0$, da keine Elemente in diesen Drahtkreisen eingeschaltet sind, also

$$\frac{eW_1}{bW_2} = \frac{dW_3}{cW_4}$$

und da $e = b$, $c = d$, so gilt

$$\frac{W_1}{W_2} = \frac{W_3}{W_4}.$$

Alle oben erwähnten Gesetze gelten auch ohne weiteres für Wechselstrom, solange die Wechsel der Stromrichtung nicht zu rasch erfolgen (etwa mehr als 1000 p. sec). Bei schnellerem Hin- und Herschwingen des Stromes erscheint der Widerstand größer als mit Gleichstrom gemessen, weil dann die Selbstinduktion (vgl. den Art. „Induktivität") eine der ursprünglichen entgegenwirkende elektromotorische Kraft erzeugt. Diese ist z. B. bei Tesla-Schwingungen (vgl. die Art. „Wechselströme" u. „Schwingungen, elektrische Schwingungen") so groß, daß ein dicker Kupferdraht dem Stromdurchgang mehr Widerstand entgegensetzt als ein dünner Kohlenfaden. Ebenso gelten dann die Gesetze von Kirchhoff nicht. Die Elektrizitätsmengen häufen sich an den Oberflächen der Drähte, die ähnlich wie Zylinderkondensatoren wirken, an; diese Anhäufungen sind groß gegenüber den infolge der raschen Wechsel nur kurze Zeit fließenden Strommengen.

3. Gesetz von Joule. Die Elektrizitätsleitung in der Materie erfolgt nur unter Verlust von elektrischer Energie, die dabei teilweise in Wärme umgesetzt wird. Nach dem Prinzip von der Erhaltung der Energie ist die verlorene elektrische Energie gleich der gewonnenen Wärmemenge. P. Joule fand 1841, daß die vom Strom erzeugte Wärmemenge proportional dem Quadrat der Stromstärke i^2 mal dem Widerstand w mal der Zeit t ist, während der ein Strom durch den Widerstand w fließt. Mißt man den Strom in Ampere, den Widerstand in Ohm, die Zeit in sec, die Wärmemenge q in g/cal, so ist $q = 0{,}239 . J^2 W . t$. Exakte Bestimmungen der Größe 0.239 des elektrischen Wärmeäquivalents haben Joule, Lenz, Qu. Icilius, H. F. Weber, Dieterici vorgenommen. Dieselbe gilt, wie insbesondere Messungen von H. Jahn zeigen, auch für Elektrolyte. Würde keine Wärme durch Strahlung und Leitung verloren gehen, so könnte man einen Eisendraht von 1 qmm Querschnitt mit einem Strom von 10 Ampere in 16 sec auf 1000° erhitzen. In Wirklichkeit wird der größte Teil der Wärme durch Leitung und Konvektionsströme der Luft sowie durch Strahlung verloren gehen. Will man daher eine hohe Temperatur z. B. hohe Weißglut, bei der Licht ausgesandt wird, erreichen, ohne daß viel Wärme ungenutzt verloren geht, so wird der betreffende Draht, z. B. ein Kohlenfaden, in einen luftleeren Raum (evakuierte Glasbirne einer Glühlampe) gebracht. Dies hat außerdem noch den Vorzug, daß Oxydation durch Luftsauerstoff vermieden ist. Je dünner ein Draht, je kleiner also sein Querschnitt, desto größer ist der Widerstand, und desto größer ist also bei gleicher Stromstärke die Joulewärme. Daher werden in den Metallfadenlampen dünne Fäden verwandt. Der Verbrauch elektrischer Energie ist natürlich immer gleich dem Gewinn an Joulewärme. — Die Umsetzung elektrischer Energie in Wärme wird in der Praxis bei vielen Vorrichtungen verwandt. Sie dient andererseits auch in der Physik als ein wichtiges Hilfsmittel kalorimetrischer Messungen, weil man auf diese Art leicht lokalisiert scharf begrenzte Energiemengen zuführen kann. Die Joulewärme liegt ferner den von W. Hankel 1848, Cardew, H. Hertz,

Digitized by Google

H. Rubens konstruierten Hitzdrahtampermetern zugrunde, mit dem man die Mittelwerte von i^2 für intermittierenden Gleichstrom und für Wechselstrom messen kann. Die Joulewärme erhitzt einen Draht, der durch eine Feder gespannt ist, und dessen Verlängerung infolge der Temperatursteigerung mit einer Rolle und Zeiger gemessen wird. Ferner dient die Joulewärme in einer Bolometeranordnung nach dem Vorgang von Paalzow und H. Rubens zur Intensitätsmessung elektrischer Wellen. Die Joulewärme bedingt ferner das von Hurmucescu entdeckte Tönen der Drähte bei Wechselstrom und wahrscheinlich den von H. Th. Simon entdeckten sprechenden Lichtbogen. Die Joulewärme folgt in metallischen und elektrolytischen Leitern denselben Gesetzen.

4. Leitfähigkeit und Einfluß der Temperatur, des Aggregatzustandes, der Modifikation. 4a) Bei Metallen. Die Leitfähigkeit ist der reziproke Wert des spezifischen Widerstandes. Man pflegt meist den letzteren, die Größe des absoluten Widerstandes, den ein Kubus von 1 ccm Rauminhalt einer Substanz dem elektrischen Strom darbietet, als Maß für die Leitfähigkeit zu betrachten. Da 106,3 cm Quecksilber von 1 qmm bei 0° einen Widerstand von 1 Ohm besitzt, so ist dessen absoluter oder spezifischer Widerstand $= \frac{1.(0,1)^2}{106,3}$ $= 0,9407.10^{-4}$ Ohm, oder die absolute Leitfähigkeit $= 1,063 \,.\, 10^4$ [Ohm^{-1}].

Die absolute elektromagnetische Leitfähigkeit wird aus der obigen technischen Leitfähigkeit durch Division mit 10^9 erhalten, ist also $1,063.10^{-5}$.

Die Methoden zur Messung von Widerständen sind in dem Artikel „Elektrischer Widerstand" auseinandergesetzt. Man findet, daß derselbe Draht bei höherer Temperatur gemessen einen größeren Widerstand besitzt, und es ergab sich, daß bei allen Metallen der Widerstand pro 1° C um etwas mehr als $^1/_{273}$ des Wertes W_0 bei 0° zunimmt. Clausius hat 1858 dies so ausgedrückt: Der Widerstand der Metalle nimmt etwa proportional der absoluten Temperatur zu. Man kann also den Widerstand w_t bei t^0 C durch folgende Formel ausdrücken

$$W_t = W_0 (1 + \alpha t),$$

worin α angenähert $\frac{1}{273} = 0,00367$ oder etwas größer ist. Bei genauen Messungen, wie sie Matthiesen und von Bose, Bénoit, H. F. Weber, Oberbeck und Bergmann, Dewar und Fleming, Jaeger und Diesselhorst durchgeführt haben, stellte sich heraus, daß der Temperaturkoeffizient α des Widerstandes auch nicht konstant bleibt, sondern meist etwas mit steigender Temperatur abnimmt, und demgemäß wird

$$W_t = W_0 (1 + \alpha t - \beta t^2)$$

geschrieben.

Wir geben im folgenden für eine Anzahl von Metallen den Wert des Widerstandes bei 0° multipliziert mit 10^4 (er ist also z. B. für Kupfer nicht 0,015, sondern 0,0000015 Ohm pro 1 ccm). Das ist dann direkt (also 0,015) der Wert des Widerstandes von einem Kupferdraht von 1 m Länge und 1 qmm Querschnitt. Die Substanzen sind fest und fein kristallinisch.

	$w.10^4$ bei 0°	$\alpha.10^3$
Silber	0,014	3,8
Kupfer	0,015	3,9
Gold	0,021	3,7
Aluminium	0,029	3,9
Magnesium	0,041	3,9
Natrium	0,040	3,3
Kalium	0,073	4,0
Calcium	0,069	—
Zink	0,061	3,7
Platin	0,108	3,9
Eisen	0,090	4,6
Blei	0,20	4,0
Antimon	0,45	4,1
Wismut	1,2	4,2
Quecksilber (fest) —39°	0,10	4,1

Man hat namentlich in den letzten Jahren Versuche über den Gültigkeitsbereich des Gesetzes von Clausius bei hohen und tiefen Temperaturen angestellt. M. von Pirani hat 1910 das Tantalmetall, das allerdings vermutlich kolloidal oder sehr fein kristallinisch ist und das in Glühlampen verwandt wird, von —190 bis 1750° untersucht und fand folgende Werte für α:

t	$\alpha.10^3$	
—190° bis 0°	3,2	Die Beobachtungen über 1750° sind wegen der schwierigen Temperaturbestimmung etwas weniger genau.
+ 20° bis 100°	2,9	
20° bis 380°	2,6	
380° bis 1750°	2,5	
1750° bis 2650°	2,3(?)	

Sehr eingehend wurde neuerdings im Laboratorium zu Leiden, das über Apparate zur Erzeugung sehr tiefer Temperaturen verfügt, von H. Kamerlingh Onnes und J. Clay die Leitfähigkeit einiger Schwermetalle bis zu sehr tiefen Temperaturen, sogar —271,5°, also bis 1,6° an den absoluten Nullpunkt heran, verfolgt. Hier genügt die oben angegebene Formel $W_t = W_0 (1 + \alpha t - \beta t^2)$ nicht mehr, wie man leicht aus der folgenden Tabelle erkennt, in der der Widerstand bei

Digitized by Google

0^0 C (= + 273,1° absoluter Temperatur) = 1 gesetzt ist.

T	Platin	Gold	Quecksilber
273,1°	1	1	1
20,1°	0,0170	0,01602	0,05641
14,3	0,0136	0,01095	0,03369
4,3	0,0119	—	0,0021
2,3°	0,0119	0,000?	0,00003
1,5°	0,0119	—	<0,0003

Man sieht, daß der Widerstand des Platins einen konstanten Wert erreicht, und dies wird mit großer Wahrscheinlichkeit dadurch erklärt, daß infolge geringer Verunreinigungen der unter 4b diskutierte Fall eintritt. Gold erreicht einen sehr kleinen kaum meßbaren Wert; festes Quecksilber erfährt bei etwa 4,0° abs. eine sprunghafte Verminderung des Widerstandes, die vermutlich mit dem Uebergang in eine andere Modifikation zusammenhängt.

Der Verlauf des Widerstandes bei tiefen Temperaturen läßt sich durch eine Formel von etwa folgender Art angenähert darstellen:

$$w_T = \frac{A}{\left(e^{\frac{A}{T}} - 1\right)^{1/2}} + B$$

Diese Formel steht in gewisser Beziehung zu der Abhängigkeit der spezifischen Wärmen von der Temperatur, wie sie durch die Untersuchungen von W. Nernst seit 1910 ermittelt wurde. Formeln dieses Typus sind von W. Nernst, von H. Kamerlingh Onnes, von F. Lindemann 1911 gegeben worden.

4b) Bei Legierungen. Die Untersuchung der Elektrizitätsleitung in Legierungen hat auf den engen Zusammenhang dieser Eigenschaft mit der inneren Struktur hingewiesen. Die ersten umfassenden Messungen hat A. Matthiesen 1857 bis 1863 durchgeführt. — Wenn man zwei Metalle zusammenschmilzt, so entsteht eine sogenannte binäre Legierung. Die mikroskopische Untersuchung ist insbesondere von Le Chatelier und die Feststellung der Schmelz- und Erstarrungskurven von G. Tammann durchgeführt.

Folgende 4 Fälle können auftreten, wie Le Chatelier und dann namentlich W. Guertler dargetan haben.

α) Die beiden Metallkomponenten, z. B. Cadmium und Blei, sind nur mischbar, aber nicht ineinander löslich. Dann liegen die Blei- und Cadmiumkristalle getrennt nebeneinander. Das Leitvermögen setzt sich dann additiv aus dem der beiden Komponenten zusammen.

$$a.\varkappa_1 + b\varkappa_2 = \varkappa(a + b).$$

Also hat eine Legierung von 30 Volumprozenten Cadmium ($K_1 = 14{,}6.10^4$) mit 70 Volumprozenten Blei ($K_2 = 5{,}1.10^4$) den Wert $\varkappa = \frac{14{,}6.30 + 5{,}1.70}{100}.10^4 = 6{,}2.10^4$. Der Temperaturkoeffizient des Widerstandes dieser Legierungen ist ebenfalls nach der obigen Mischungsregel aus dem für reine Metalle zu berechnen; er ist also nie sehr von + 0,004 verschieden (Beispiele: Cd—Zn; Cd—Pb; Cd—Sn; Sn—Pb; Zn—Sn).

β) Die beiden Komponenten bilden miteinander isomorphe Mischkristalle (sogenannte feste Lösung). Man sieht also in der Legierung nur eine Art Kristall.

a) Falls dies für jedes Mengenverhältnis der beiden Metalle zutrifft, wie z. B. bei Gold und Silber, so erhält man eine Kurve wie Figur 3. Hier ist nach oben als Ordi-

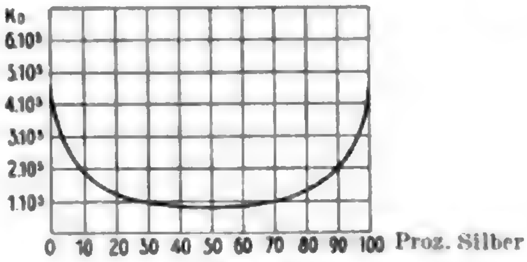


Fig. 3.

nate die Größe der Leitfähigkeit, nach rechts als Abszisse der Prozentgehalt an Silber aufgetragen. Charakteristisch ist, daß schon geringe Beimengungen von Gold zu reinem Silber oder von Silber zu reinem Gold eine sehr starke Leitfähigkeitsabnahme verursachen. Bei etwa gleichen Teilen hat diese Widerstandszunahme ein Maximum erreicht. Die Größe des Einflusses von Beimengungen läßt sich nicht berechnen, doch haben, wie z. B. Benedicks 1902 für Stahl fand, gleichviel Atomprozente a bei kleinen Zusätzen (Prozentgehalt p, Atomgewicht $A_1(A_2)$ so ist $a = 100.\frac{\frac{p_1}{A_1}}{\frac{p_1}{A_1} + \frac{100 - p_1}{A_2}}$) dieselbe Wirkung. Wenn reines Eisen (A = 55,9) einen spezifischen Widerstand von $7{,}6.10^{-6}$ besitzt, und 0,3 % Kohle beigemengt sind, so hat das 0,3 prozentige Kohlenstoffeisen (A = 12) einen Widerstand $W_0 = (7{,}6 + 5{,}9.a)10^{-6}$. Hierin ist $a = 100.\frac{\frac{0{,}3}{12}}{\frac{0{,}3}{12} + \frac{99{,}7}{55{,}9}} = 1{,}4$. Also ist $W_0 = 15{,}8.10^{-6}$. Es würden dann 0,78 prozentiger Phosphor (A = 31) dieselbe Widerstandszunahme bewirken, da

Digitized by Google

$$a = 100 \cdot \frac{\frac{0,78}{31}}{\frac{0,78}{31} + \frac{99,5}{55,9}} = 1,4.$$

Demgemäß ist die Wirkung abhängig von der Zahl der Atome der Beimengung verglichen mit der Atomzahl des reinen Metalles.

Der Temperaturkoeffizient solcher Legierungen, mögen sie aus zwei oder mehreren Komponenten bestehen, ist auch bei hohen und ganz tiefen Temperaturen sehr klein. Man wird also praktisch, wenn der Widerstand größer sein darf, der Energieverlust nicht in Betracht kommt, aber Konstanz des Widerstandes gewünscht wird, solche Legierungen verwenden.

Daher werden die Meßwiderstände (Rheostaten) aus derartigen Legierungen zusammengesetzt. Ferner werden zur Schwächung des Stromes, wenn der Energieverlust wieder ohne Belang ist, Legierungen dieser Art benutzt, weil ihr Widerstand viel höher ist als der von Metallen. Man sieht das aus folgender Tabelle:

	Zusammensetzung Gewichtsprozente	w_0	Temperatur-Koeff.
Konstantan	60Cu 40Ni	$0{,}49 \cdot 10^{-4}$	$+3 \cdot 10^{-5}$ bis $5 \cdot 10^{-5}$
Manganin	84Cu,12Mn,4Ni	$0{,}42 \cdot 10^{-4}$	$+3 \cdot 10^{-5}$
Platinrhodium	10Rh.90Pt	$0{,}20 \cdot 10^{-4}$	$1{,}7 \cdot 10^{-3}$
Zur Vergleichung:			
Kupfer	—	$0{,}015 \cdot 10^{-4}$	$3{,}9 \cdot 10^{-3}$

Angenähert gilt eine von Matthiesen gefundene, von Guertler bestätigte Regel:

$$\frac{\alpha . 10^4}{1 + \alpha . 10^4} = \frac{29 . \varkappa}{\varkappa_m}$$

hierin ist K_m die nach der Mischungsregel berechnete Leitfähigkeit, also für Manganin, falls statt der Volumprozente Gewichtsprozente genommen werden, was keinen großen Fehler bedingt, ist $\varkappa_m = (84.64 + 12.11 + 4.14,4).10^4.10^{-2} = 56.10^4$, $\varkappa = 2,39.10^4$, also die rechte Seite $= 1,24$ und demgemäß $\alpha = 1,2.10^{-4}$, gefunden 1 bis $0,3.10^{-4}$.

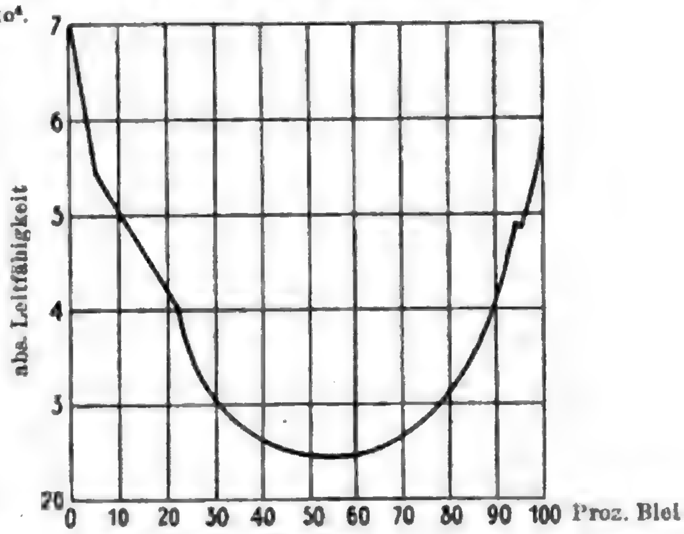
Einfacher als die oben erwähnten Beziehungen ist folgende von Matthiesen aufgestellte häufig genügende Regel: Für jede Temperatur ist der beobachtete Widerstand w_t weniger dem aus der Mischungsregel (vgl. b. α) berechneten Widerstand gleich demselben konstanten Wert ($W_t - W_m$ = const.). Man sieht, daß die von Benedicks gegegebene Fassung (vgl. oben) ein Spezialfall ist, bei dem an Stelle des aus der Mischungsregel berechneten Widerstandes einfach derjenige des Eisens gesetzt wurde. Diese Regel hat J. Clay an Gold- und Silberlegierungen bis zu —252° geprüft und bestätigt gefunden.

Beispiele für diese Gruppe sind viele zur selben Vertikalreihe des periodischen Systems gehörigen Elemente.

b) Wenn die Bildung isomorpher Mischkristalle nur bis zu einer beschränkten Konzentration einer Komponente geht, so werden in der Legierung Mischkristalle der maximalen Konzentration entsprechend vorhanden sein und daneben entweder die andere Komponente rein oder auch als Mischkristall. Ein Beispiel ist kohlenstoffreiches Eisen, mit z. B. 1 % Beimengung; denn mehr als 0,27 % können bei Temperaturen etwa unter 600° nicht in den Mischkristall Eisen—Kohle aufgenommen werden und scheiden sich in dem Kohleneisen von 0,27 % C als Graphit in einer Menge von 1 bis 0,27 = 0,73 % aus. Für diese Gemenge gilt dann die Mischungsregel und praktisch hat, wie die Rechnung ergibt, diese Menge freien Graphits keinen wesentlichen Einfluß.

Beispiele für diese Gruppe sind u. a. manche Elemente, die sich in der elektrischen Spannungsreihe sehr nahe stehen. Einen komplizierten Fall stellt Fig. 4 dar.

γ) Die beiden Komponenten bilden eine oder mehrere che-



Blei-Thalliumlegierung
Fig. 4.

mische Verbindungen miteinander. Diese entsprechen bestimmten Gewichtsverhältnissen der Komponente, wobei die atomaren Mengen (Prozentgehalt durch Atomgewicht) in einfachem rationalem Verhältnis stehen, z. B. 19 % Mg (A = 24,36) und 81% Pb (A=206,9), $\frac{19}{24,36} = 0,78$ bezw. $\frac{81}{206,9} = 0,39$ und 0,78:0,39 = 2:1.

Diese binären Verbindungen haben einen erheblich größeren Widerstand als die beiden reinen Metalle, aus denen sie sich zusammensetzen. Ihr Temperaturkoeffizient des Widerstandes ist von der Größenordnung wie bei Metallen; doch müssen Uebergänge zu den Halbleitern vorhanden sein. Dies kann aber elektrisch erst bei tiefen Temperaturen hervortreten. Ob chemische Verbindungen wie Selensilber, Tellursilber hierher zu den Legierungsverbindungen oder zu den Halbleitern zu rechnen sind, bleibt ungewiß. Hier seien folgende Beispiele für Widerstände von Metallverbindungen verglichen mit denen der reinen Metalle gegeben:

	$w_0 \cdot 10^4$	α
CdSb	5,00	0,0046
Cd_2Sb_3	4,06	0,0012
Cu_2Zn	0,630	0,0016
Cu	0,015	0,0039
Zn	0,061	0,0037
Cd	0,076	0,0040
Sb	0,390	0,0040

Im allgemeinen läßt sich sagen, daß, je weniger elektropositiv eine der beiden Komponenten ist, um so größer der Widerstand der Verbindung wird. Verbindungen bilden z. B. Au—Sn, Cu—Sb, Cu—Zn, Cu—Sn (vgl. Fig. 5), also Elemente, die einen größeren Abstand in der Spannungsreihe, eine verschiedene Elektroaffinität besitzen.

Werden die beiden Elemente nicht im Verhältnis ihrer Verbindungsgewichte zusammengeschmolzen, so entstehen neben den Kristallen der Verbindung entweder solche der einen Komponente (Fall I) oder Mischkristalle (Fall II). Die Abhängigkeit der Leitfähigkeit von dem Prozentgehalt der Komponenten kann dann sehr kompliziert werden (vgl. Fig. 5).

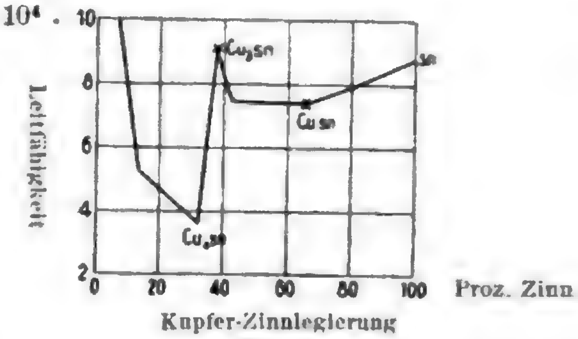


Fig. 5.

Einfluß des Aggregatzustandes und der Modifikation bei Metallen und Legierungen. Im flüssigen Zustand leiten die Metalle ebenfalls die Elektrizität. Wenn ihr Volum als Flüssigkeit größer ist, was meist zutrifft, so zeigen sie eine Vergrößerung des Widerstandes, wenn das Volumen kleiner ist, eine Zunahme. Nur Antimon scheint eine Ausnahme zu bilden.

Substanz	Schmelzpunkt	Widerstand flüssig: fest	Dichte flüssig: fest	Temperatur Koeff. flüssig
Quecksilber	— 38,8°	4,1	0,965	0,00090
Kalium	62,5	1,39	0,977	0,00424
Natrium	97,6	1,39	0,977	0,00333
Lithium	178	2,51	—	0,00273
Zinn	232	2,2	0,958	—
Wismut	269	0,46	1,033	0,00037
Cadmium	321	1,96	0,955	—
Blei	327	1,95	0,968	—
Antimon	629	0,70	<1	—

Legierungen zeigen nach den Untersuchungen von C. L. Weber ein ähnliches Verhalten. Sehr kompliziert ist das Verhalten der Amalgame; es sei nur auf die neueste Untersuchung von A. Larsen hingewiesen.

Neuere Untersuchungen von P. Czermak 1912 zeigten, daß nicht etwa gelöste Gase die Ursache sind, daß die Leitfähigkeit beim Schmelzen einen Sprung erleidet, daß also bei derselben Temperatur das reine feste Metall einen anderen Widerstandswert als das flüssige zeigt.

Die Temperaturkoeffizienten des flüssigen Metalls sind zum Teil erheblich niedriger als in dem festen Zustand.

Es mag hier noch bemerkt werden, daß, wie J. J. Thomson fand, die Metalldämpfe,

Digitized by Google

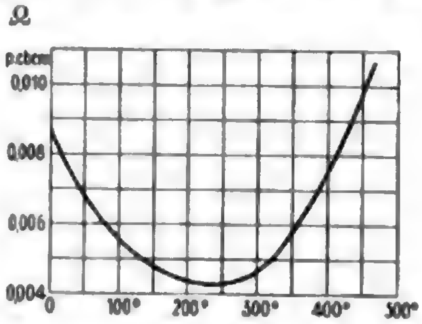
z. B. Quecksilberdampf, keinerlei Leitfähigkeit bei gewöhnlicher Temperatur und Dichte besitzen.

Bei dem Uebergang von Eisen und Nickel aus dem magnetischen in den unmagnetischen Zustand (α- und β-Eisen) bei 800° bezw. 350° scheint die Leitfähigkeit, wie Hopkinson, Le Chatelier, Harrison fanden, sich rasch, aber kontinuierlich zu ändern. Bei Quecksilber scheint nach Kamerlingh Onnes bei etwa 4° abs. (— 269°) eine sprunghafte Widerstandsverminderung aufzutreten, sonst liegen für Metalle noch keine derartigen Beobachtungen vor.

4c) Bei Halbleitern. Die meisten festen Körper, soweit es nicht Metalle oder ausgesprochene Salze, Säuren und Basen sind, leiten, wie J. Koenigsberger 1907 gefunden hat, die Elektrizität, ohne Materie zu transportieren, also wie die Metalle. Dies Verhalten hatte 1858 Matthiesen an Kohlen gefunden, und Hittorf hatte 1851 Schwefelsilber daraufhin eingehender untersucht. Daß z. B. bei Bleisulfid (PbS_2) keine Materie durch Ionenleitung bewegt wird, hat O. Reichenheim durch direkten Versuch nachgewiesen. Daher fehlt auch Polarisation. Irgendein Unterschied besteht zwischen den aus Schmelzfluß erstarrten feinen kristallinischen Massen und den einheitlichen Kristallen nicht, wie eine Vergleichung der Messungen von J. Guinchant und K. Schilling zeigt; nur tritt der Einfluß der verschiedenen Modifikationen stärker hervor als bei Metallen. Gepreßte Pulver von Metallsulfiden hat zuerst F. Streintz untersucht und gefunden, daß bei einigen positive, bei anderen negative Temperaturkoeffizienten vorkommen. J. Koenigsberger, O. Reichenheim haben dann gefunden, daß der Temperaturkoeffizient des Widerstandes bei derselben Substanz erst negativ und dann mit steigender Temperatur 0 und schließlich positiv werden kann. Die Leitfähigkeit der meisten Halbleiter ist schlecht und wird erst bei höherer Temperatur besser. Der Widerstand nimmt mit steigender Temperatur um so stärker ab, je größer er ist, wie aus folgender Tabelle hervorgeht:

Eisentitanoxyd T	Eisentitanoxyd w_0	Eisenoxyduloxyd T	Eisenoxyduloxyd w_0
— 188	2 100 000	15°	0,00794
— 154	1 250 000	82°	0,00582
— 104	13 900	150°	0,00486
— 74	3 850	221°	0,00434
+ 18	218	280°	0,00446
+ 65	69	310°	0,00500
+ 125	23,5	410°	0,00770
+ 200	9,0	485°	0,0112
+ 315	3,6		

Der Widerstand hat bei einer bestimmten Temperatur einen kleinsten Wert, ein Minimum, z. B. für Magnetit bei 250° (vgl.



Magnetit
Fig. 6.

Fig. 6). Die Aenderung des Widerstandes läßt sich, wie J. Koenigsberger zeigte, durch eine Formel

$$W = W_0 . e^{-\frac{Q}{RT}} (1 + \alpha t \pm \beta t^2)$$

darstellen, worin α und β ungefähr dieselbe Größe wie bei Metallen besitzen und Q eine für die Substanz charakteristische Größe ist.

Wir geben im folgenden nach den Messungen den Wert von Q, soweit derselbe berechnet ist oder sich einigermaßen sicher schätzen läßt.

Substanz	Q
1. Elemente:	
Silicium α*	1 600
Titan α	400
Zirkon α	50(?)
Tellur (?)	2 000(?)
2. Oxyde:	
a) undurchsichtige	
Eisenglanz, par. Achse, α	2 800
Eisenglanz, senkr. Achse, α	2 600
Molybdänglanz α	2 800
Magnetit α	600
Kupferoxydul	5 000
b) durchsichtige	
Quarz	20 000
Kupferoxyd	12 000
3. Sulfide:	
Eisensulfid α	1 000
Eisendisulfid α (Pyrit)	480
Antimonglanz	20 000
4. Mehrfach zusammengesetzte Verbindungen	
Chrysoberyll	9 600
Wolframit	8 800
Eisentitanoxyd α	5 400

* Mit α ist eine bestimmte Modifikation der Substanz bezeichnet.

Für den Praktiker ist besonders beachtenswert, daß die durchsichtigen Oxyde, wie Quarz, Zirkon, Calciumoxyd usw. zu den metallischen Halbleitern gehören, bei denen die Leitfähigkeit mit steigender Temperatur stark zunimmt. Hier seien nur folgende

Messungen von C. Doelter, v. Pirani und v. Siemens an Quarz und von W. Dietrich an Hartgummi gegeben.

Quarz		Hartgummi	
t	W	t	W
770°	$1,5 . 10^5$	20	$>2 . 10^{16}$
1000°	$4 . 10^4$	93	$1,8 . 10^{13}$
1200°	$1,0 . 10^4$	122	$1,1 . 10^{12}$
		180	$3 . 10^{11}$

Fälle, de chemisch etwa dem der Legierungen von Metallen entsprechen, elektrisch aber gerade das Entgegengesetzte, nämlich eine Widerstandsverminderung bedingen, hat K. Baedeker studiert. Er fand, daß bei Einwirkung von Jod auf festes Kupferjodür oder Silberjodid, also einer Art Legierung von Halbleitern, ein sehr viel besser leitendes Produkt entsteht So ist Jod praktisch ein Isolator, Kupferjodür leitet sehr schlecht $W_0 > 1000\ \Omega$, während das Jod-Kupferjodür bei 18° $w_0 = 0,01\ \Omega$ und bei 70° $= 0,005\ \Omega$ zeigt.

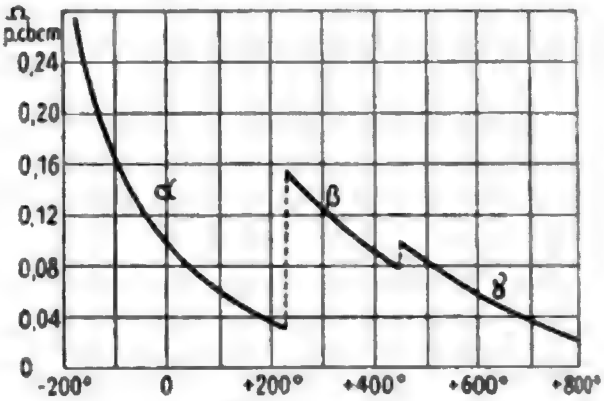
Flüssige metallische Halbleiter sind bisher noch wenig untersucht, zu ihnen gehört nach den Beobachtungen von K. Schilling geschmolzenes Antimonsulfid, das recht gut, und geschmolzenes Naphthalin das sehr wenig leitet. Es scheint die obige Formel auch bei ihnen die Abhängigkeit des Widerstandes von der Temperatur darzustellen.

Die festen Halbleiter existieren meist in verschiedenen Modifikationen, die kristallographisch oft nur wenig voneinander verschieden sind, aber Unterschiede im Leitvermögen aufweisen. So leitet Kohlenstoff als Graphit die Elektrizität bei gewöhnlicher Temperatur sehr gut (es scheint nach den neuesten Messungen von M. von Pirani zwei Graphitmodifikationen, eine metallische α und eine halbleitende β zu geben), als Diamant sehr schlecht. Erst bei 1200° wird, wie C. Doelter fand, die Leitfähigkeit des Diamantes erheblich.

Graphit β		Diamant	
t	w_0	t	w_0
—185°	$4,3 . 10^{-3}$	950°	$5,9 . 10^5$
— 66°	$3,3 . 10^{-3}$	1050	$2,9 . 10^5$
+ 29°	$2,8 . 10^{-3}$	1150	$1,4 . 10^4$
+105°	$2,5 . 10^{-3}$	1240	$3,2 . 10^3$
+181°	$2,25 . 10^{-3}$		

Silicium hat, wie K. Schilling fand, 3 Modifikationen, α, β und γ, die drei Unstetigkeiten oder Sprünge der Leitfähigkeit bewirken (vgl. Fig. 7).

4d) Bei festen Elektrolyten. Viele Salze besitzen auch im festen Zustand ein gut meßbares elektrolytisches Leitvermögen. E. Wiedemann, W. Kohlrausch, L. Graetz haben die Haloide der Schwermetalle untersucht und einen starken Anstieg der Leitfähigkeit mit der Temperatur gefunden. Im folgenden sei als Beispiel Cadmiumchlorid nach den Messungen von L. Graetz angeführt.



Siliciummetall
Fig. 7.

t	Leitvermögen
370	0,0007
400	0,0013
430	0,0022
460	0,0036
490	0,0075
520	0,062
540	1,016

Inwieweit neben der elektrolytischen Leitung bei diesen und anderen Salzen noch geringe metallische Leitung statthat, läßt sich schwer sagen. Jedenfalls weist die vorhandene Polarisation auf Ionenleitung. Der Transport von Materie bei dem Stromdurchgang durch Glas ist von E. Warburg 1884 nachgewiesen worden. Man kann Natriummetall aus Quecksilberamalgam mittels Strom durch Glas hindurch schicken, wenn man durch Erhitzen die Leitung des Glases verbessert. Auf diese Art kann reines Alkalimetall in abgeschlossene luftleere Vakuumröhren eingeführt werden. Neuerdings haben F. Haber und St. Tolluczko andere feste Elektrolyten, Chlorbarium, Chlornatrium, untersucht und sie auch wie die Säure- oder Salzlösungen in einem Element als Zwischensubstanz zwischen zwei in der Spannungsreihe verschiedenen Metallen verwandt; man hat dann wirkliche „Trockenelemente". Bei manchen Halbleitern bedingen Beimengungen und Einschlüsse bei tiefer Temperatur ein Vorwiegen der elektrolytischen Leitung. Warburg, Tegetmeier und P. Curie haben im Quarz parallel zur c-Achse einen solchen Fall studiert.

Digitized by Google

Von einheitlichen kristallisierten Substanzen mit ausgesprochener Ionenleitung sollen einige Zahlen für Korund (Al_2O_3) nach C. Doelter und für Baryt nach K. Schilling gegeben werden:

Baryt		Korund	
t	w_0	t	w_0
726	$1{,}5 \cdot 10^5$	830	$2{,}0 \cdot 10^5$
713	$7{,}8 \cdot 10^4$	930	$5 \cdot 10^4$
907	$1{,}9 \cdot 10^4$	1080	$1{,}5 \cdot 10^4$
963	$1{,}0 \cdot 10^4$	1180	$8 \cdot 10^3$
		1230	$6 \cdot 10^3$

Angenähert lassen sich diese Widerstandsveränderungen bei Elektrolyten durch die Formel darstellen

$$W = W_0 e^{-\frac{Q}{RT}}$$

wie E. Rasch und W. Hinrichsen und C. Doelter gezeigt haben.

Bei ganz hoher Temperatur über etwa 1100° scheint bei den Silikaten neben metallischer auch elektrolytische Leitung aufzutreten; doch sind diese Fragen noch nicht geklärt. Wenn die Größe $\frac{Q}{R}$ kleiner als etwa 10 000, also, da R nahe = 2, $Q < 20\,000$ ist, so leitet der Körper meist metallisch, wenn $Q > 20\,000$ ist, meist elektrolytisch.

Verschiedene Modifikationen besitzen verschiedenes Ionen-Leitvermögen (z. B. Jodsilber mit Umwandlung bei 139°, Quecksilberjodid bei 110°).

Inwieweit die Gemenge von Oxyden, wie sie von W. Nernst 1899 in den von ihm erfundenen Glühstiften verwandt werden, elektrolytische oder metallische Leitung zeigen, ist noch ungewiß; die Versuche von E. Bose 1902 deuten teilweise auf Elektrolyse, neue Versuche des Verfassers auf vorwiegend metallische Leitung. Jedenfalls hat aber Reynolds nachgewiesen, daß manche Mischungen verschiedener Oxyde weit besser leiten, als sich nach der Mischungsregel ergeben würde.

5. Beziehungen zu anderen Gebieten der Physik. 5a) Gesetz von Wiedemann und Franz. Zwischen dem Leitvermögen für Elektrizität und dem für Wärme bestehen nicht nur weitgehende mathematische Analogien in den phänomenologischen Theorien (siehe unter 6), sondern auch tiefer begründete Uebereinstimmungen. G. Wiedemann und R. Franz konnten 1853 aus Versuchen das Gesetz ableiten, daß der Quotient Wärmeleitung durch Elektrizitätsleitung = L für eine bestimmte Temperatur bei den Metallen konstant ist. Die Beobachtungen von L. Lorenz 1882 und von W. Jäger und H. Diesselhorst 1906 zeigten, daß dieser Quotient etwa proportional der absoluten Temperatur wächst, also sein Temperaturkoeffizient α nahe = 0,00367 ist. In folgender Tabelle ist für eine Anzahl guter und schlechter metallischer Leiter L bei 18° und α angegeben.

	$L \cdot 10^{-10}$	α
Aluminium	6,36	$4{,}37 \cdot 10^{-3}$
Kupfer	6,71	$3{,}95 \cdot 10^{-3}$
Zink	6,72	$3{,}85 \cdot 10^{-3}$
Silber	6,86	$3{,}77 \cdot 10^{-3}$
Gold	7,09	$3{,}75 \cdot 10^{-3}$
Blei	7,15	$4{,}07 \cdot 10^{-3}$
Platin	7,53	$4{,}64 \cdot 10^{-3}$
Eisen	8,02	$4{,}32 \cdot 10^{-3}$
Antimon	9,63	—
Wismut	9,64	$1{,}51 \cdot 10^{-3}$
Konstantan	11,06	$2{,}39 \cdot 10^{-3}$
Graphit	1 180	—
Silicium	69 000	—
Eisenoxyd	73 000	—

Aus dieser Reihe folgt, daß bei schlechterer elektrischer Leitfähigkeit die Wärmeleitung sich weniger stark verringert. Dies hat J. Koenigsberger 1907 durch die auch bei den Metallen vorhandene Isolatorwärmeleitfähigkeit erklärt. Die Leitfähigkeit für Wärme, die elektrische Isolatoren wie Glas, Schwefel und z. B. sehr stark Diamant besitzen, erfolgt nicht durch den Mechanismus, der in Metallen die Elektrizitätsleitung und den Hauptteil der Wärmeleitung besorgt, sondern durch Teile, die frei von elektrischer Beeinflussung sind. Wenn man die Isolatorwärmeleitfähigkeit bestimmen und dann von der gesamten Wärmeleitfähigkeit abziehen würde, so könnte man das Gesetz von Wiedemann und Franz als allgemein gültig ansehen.

Bei tiefen Temperaturen wird die Größe L_t ebenso wie die elektrische Leitfähigkeit nicht mehr durch die Formel

$$L_t = L_0 (1 + \alpha t)$$

dargestellt; man muß vielmehr, wie die Messungen von Ch. Lees gezeigt haben, eine ähnliche Formel wie S. 351 angegeben verwenden. Außerdem tritt, da die metallische Wärmeleitfähigkeit mit sinkender Temperatur abnimmt, die Isolatorleitung dann stärker hervor.

5b) Photoeffekte. Auffallendes Licht verbessert bei einigen Substanzen das elektrische Leitvermögen. Willoughby Smith entdeckte 1873 diese, Photoeffekt genannte, Erscheinung an sogenanntem kristallinischem Selen. Ein gut lichtempfindliches Präparat dieses Elementes erhält man, wie W. Siemens 1876 fand, durch Erhitzen von amorphem Selen auf 100°. Seitdem ist die Herstellungs-

Digitized by Google

weise der Präparate von verschiedenen Firmen noch erheblich verbessert; man sucht Präparate herzustellen, die bei Belichtung gleich erheblich besser leiten und bei Verdunkeln möglichst rasch wieder den ursprünglichen hohen Widerstandswert annehmen. Man schickt am besten den Strom senkrecht zu den Lichtstrahlen hindurch. Eine besonders interessante technische Verwendung findet diese Substanz bei der Fernübermittelung von Zeichnungen, Photographien durch die von A. Korn 1907 entdeckte Fernphotographie. Wir können auf die Apparatur nicht näher eingehen; wesentlich bei der Methode ist die Verwendung eines Selenzylinders, der, je nachdem durch eine helle oder dunkle Stelle der Photographie oder eigentlich des Rasterbildes Licht auf ihn geschickt wird, mehr oder weniger Licht empfängt und demgemäß mehr oder weniger gut leitet vgl. den Artikel „Fernphotographie". Zahlreiche Untersuchungen, insbesondere von Bidwell, Majorana, wurden angestellt, um die Einzelheiten des merkwürdigen Vorganges zu klären. Die Untersuchungen von R. Marc 1907 und von M. Sperling 1908 haben unsere Kenntnisse wesentlich erweitert. Das lichtempfindliche Selen ist danach eine Mischung von schlecht leitendem und gut leitendem Selen, deren Mischungsverhältnis durch das Licht zugunsten der metallischen Modifikation verschoben wird. Ein sogenannter Schatteneffekt wurde aufgefunden.

G. F. Jaeger entdeckte 1907 eine zweite Substanz mit ähnlichem Verhalten, Schwefelantimon als Antimonglanz. Dessen Verhalten wurde eingehend 1911 von Hilda von Martin studiert. Rotes Licht gibt die stärkste Widerstandsverminderung, Ultrarot wirkt auch noch. Die Tatsachen weisen auf einen inneren photoelektrischen Effekt hin, ähnlich der von P. Lenard und F. Saeland an phosphoreszierenden Präparaten entdeckten aktinodielektrischen Wirkung. Die Leitfähigkeitsverbesserung der Silberhaloide durch Licht hat 1888 Sv. Arrhenius entdeckt. Vermutlich löst das Licht einen chemischen Vorgang aus, der dann auf die Leitfähigkeit zurückwirkt und diese verbessert, wie H. Scholl fand. Dasselbe gilt nach den Beobachtungen von K. Baedeker und G. Rudert für Kupferjodür.

5c) Einfluß des Drucks. Der Widerstand wird ferner noch durch einen allseitigen hydrostatischen Druck beeinflußt, und zwar meist vergrößert, wie O. Chwolson 1880 entdeckte. Im folgenden sind einige von Lisells und von Williams an Metallen und Legierungen, von Monten und von Beckmann an Halbleitern gemessene Werte der Aenderung des Widerstandes dW für 1 Atmosphäre dividiert durch den Widerstand w beim Druck 0 $= \frac{dW}{W}$ mitgeteilt.

Quecksilber	$\frac{dW}{W}$ -32.10^{-6}
Blei	$-14{,}4.10^{-6}$
Silber	$-3{,}8.10^{-6}$
Platin	$-1{,}8.10^{-6}$
Konstantan	$-0{,}64.10^{-6}$
Manganin	$+2{,}22.10^{-6}$
Wismut	$+19{,}6.10^{-6}$
Schwefelsilber	$-1{,}0.10^{-3}$
Selen	-1.10^{-2}
Pyrit (Eisendisulfid)	$-2{,}2.10^{-6}$
Eisenglanz par. Axe	$-6{,}6.10^{-6}$

Im allgemeinen ist die Aenderung um so stärker, je leichter der Körper zusammendrückbar ist, je größer seine Kompressibilität ist. Doch läßt sich die Richtung der Aenderung nicht angeben. Temporäre Deformationen wie Dehnung und Torsion verkleinern, wie A. Mousson 1855 fand, meist die Leitfähigkeit.

Für die Praxis von Bedeutung ist der von E. B. Rosa und H. D. Babcock 1907 entdeckte Einfluß der Feuchtigkeit auf die Schellackisolation. Diese quillt durch Aufnahme von Wasser auf und dehnt den Widerstandsdraht. Hierdurch nimmt dessen Widerstand zu.

Das Ziehen von Drähten, also eine dauernde Deformation, verursacht eine Vergrößerung des Widerstandes.

G. Tammann hat 1911 eine Erklärung hierfür gegeben; beim Ziehen werden die einzelnen ungeordneten Kristalle durch Gleitflächen in Lamellen zerlegt, die sich parallel anordnen, und die, wie es scheint, parallel zur Gleitfläche größeren elektrischen Widerstand bieten. Beim Glühen wird der Vorgang rückgängig gemacht.

5d) Elektrizitätsleitung in den Dielektrika. Halbleiter, deren Leitvermögen sehr schlecht ist, zeigen in Flüssigkeiten zwischen zwei Kondensatorplatten eigentümliche Rotationsphänomene, die G. Quincke 1896 entdeckte. L. Heydweiller hat 1896 die Erklärung für diese Erscheinungen gegeben; sie beruhen auf einer Leitung der Elektrizität in der Flüssigkeit und auf einer Abstoßung zwischen Platte und Kugel, durch die gleichartigen Elektrizitäten, die von den Kondensatorplatten auf die gegenüberstehenden Teile der Kugel geleitet worden sind. Je besser der feste Körper im Vergleich zur Flüssigkeit isoliert, um so rascher ist die Rotation. L. Graetz gelang es 1900 auch noch bei sehr schwach

Digitized by Google

leitenden Flüssigkeiten, die durch Röntgenstrahlen ionisiert worden waren, die Rotation nachzuweisen.

5e) Elektrische Endosmose. Elektrische Stromeffekte an der Grenze fest-flüssig. F. F. Reuß entdeckte 1809, daß, wenn man in einem Rohr mit Wasser einen Tonzylinder, ein Diaphragma, anbringt und dann einen elektrischen Strom durchleitet, das Wasser, abgesehen von der elektrolytischen Zersetzung, bewegt wird und nach der Kathode wandert. Diese Erscheinung wird elektrische Endosmose genannt, weil die Elektrizität gewissermaßen einen osmotischen Druck bewirkt. G. Wiedemann fand 1852, daß die Menge der in gleichen Zeiten durch den Tonzylinder geführten Flüssigkeit der Stromstärke proportional und unabhängig von der Oberfläche und Dicke des Tonzylinders ist. G. Wiedemann und später C. Freund haben auch noch die Kraft, mit der die Flüssigkeit vom Strom durch das Diaphragma getrieben wird, mittels der Druckhöhe gemessen, bis zu der sie emporgetrieben wird. G. Quincke hat 1861 die Ursache dieser Erscheinungen in dem Zusammenwirken der Flüssigkeit und der Wand der engen Oeffnungen gefunden. Quincke konnte in Kapillaren dieselben Erscheinungen beobachten. Die Erscheinungen treten auch in schlechtleitenden Flüssigkeiten auf, an die dann hohe Spannungen angelegt werden müssen. Aus seinen Versuchen folgte, daß die Flüssigkeit um so mehr gegen die Kathode hingetrieben wurde und um so mehr emporstieg, je größer die Oberfläche der Röhrenwandung im Vergleich zum Querschnitt und je stärker der Strom war. Quincke fand ferner, daß es Flüssigkeiten gibt, die im umgekehrten Sinne zur Anode fließen und daß dies von der Beschaffenheit der Röhrenwandung abhängt. G. Quincke hat auch die Umkehrung dieser Erscheinungen, die Strömungsströme, entdeckt. Wenn reines Wasser durch einen porösen Körper fließt, so entsteht eine Potentialdifferenz und dadurch ein elektrischer Strom. Die Potentialdifferenz ist proportional dem Druck, mit dem die Flüssigkeit durch das Diaphragma oder nach F. Zöllner durch eine Kapillare durchgepreßt wird, und bei Röhren, wie E. Dorn fand, umgekehrt proportional dem Durchmesser, wenn die Geschwindigkeit der Flüssigkeit die gleiche bleibt. Weitere Versuche von E. Dorn und von J. Elster zeigten, daß ein freier Wasserstrahl solche elektrischen Kräfte nicht aufweist, und daß Reibung der Flüssigkeit an der Wandung die Ursache der Elektrizitätserzeugung ist. H. von Helmholtz hat dann die genaue mathematische Theorie der Erscheinungen durchgeführt, die von Dorn und Saxèn geprüft und bestätigt wurde.

Im Zusammenhang hiermit stehen Beobachtungen von A. Coehn und von G. Bredig über die Mitführung von Kolloiden durch den Strom, die auch praktisch für die Klärung trüber Flüssigkeiten von Bedeutung sind. Sie leiten hinüber zu der Mitführung kleiner Teile durch den elektrischen Strom, die Reuß und M. Faraday entdeckt hatten. Die Geschwindigkeit der kleinen Teile ist proportional der Stromintensität und hängt von der Beschaffenheit der Teile und der Flüssigkeit ab. Die von F. Braun entdeckte Elektrostenolyse ist, wie A. Coehn ausführte, auf dieselben Ursachen wie die Endosmose zurückzuführen. Wenn ein Strom durch eine Metallsalzlösung in einer engen Glasspalte durchgeschickt wird, so scheidet sich an der Glaswand Metall ab. Hieraus haben sich eine Anzahl Ergebnisse ableiten lassen, deren Bedeutung hauptsächlich auf elektrochemischem Gebiet liegt (vgl. den Artikel „Elektroosmose").

6. Phänomenologische Theorie der Leitung oder stationären Strömung. In dem Artikel „Dielektrizität der Krystalle" hat E. Riecke den Unterschied zwischen phänomenologischen und molekularen Theorien auseinandergesetzt. Die phänomenologische Theorie der zeitlich unveränderlichen oder stationären Elektrizitätsströmung ist namentlich von G. Kirchhoff, H. v. Helmholtz, Cl. Maxwell entwickelt worden; sie ruht auf wenigen ganz sicheren Voraussetzungen und findet ihre Anwendung ähnlich wie die Theorie der Wärmeleitung von Fourier wesentlich in der Lösung der geometrischen Probleme der Stromverteilung bezw. der Widerstandsberechnung. Wir können auf die zu schwierigen Problemen der Funktionentheorie führenden Differentialgleichungen nur kurz eingehen. Durch Anwendung des Gesetzes von Ohm auf ein unendlich kleines Raumelement des Leiters kommt man zu der sogenannten Gleichung von Laplace, daß die Summe der zweiten Differentialquotienten des Potentials der elektromotorischen Kraft nach den drei Richtungen im Raum gleich Null ist. Außerdem erhält man Randbedingungen für die ersten Differentialquotienten des Potentials nach der Normale senkrecht zur begrenzenden Fläche und für die Werte des Potentials zu beiden Seiten einer Grenzfläche. Die Theorie der Stromverteilung in der Ebene ist die der analytischen Funktionen; daher sind eine große Zahl von praktisch wichtigen Problemen schon mathematisch behandelt. Dagegen kann die Verteilung von Strömen in einem räum-

Digitized by Google

lichen Leiter nur in einzelnen Fällen berechnet werden.

Der praktisch wichtige Fall des Ausbreitungswiderstandes unter verschiedenen Bedingungen ist genügend genau von Maxwell, Rayleigh und Kirchhoff studiert. Ferner sind die Gesamtwiderstände einer Anzahl einfacher Körper durch die mathematische Analyse ermittelt worden.

7. Die Elektronentheorien der Elektrizitätsleitung. Wir können im folgenden nicht die gründliche mathematische Kenntnisse erfordernden strengen Ableitungen der Formeln geben, sondern begnügen uns damit, dieselben, soweit möglich, zu veranschaulichen.

W. Weber hat 1862 die Hypothese aufgestellt, daß positiv geladene kleinste Teile von einem Molekül zum anderen geschleudert werden und so die Elektrizitätsleitung vermitteln. W. Giese hat dann angenommen, daß wie in Elektrolyten, so in den Metallen die Elektrizität an Atome, also in Ionen, gebunden sei. Die Versuche von E. Riecke (vgl. S. 348) zeigten aber, daß diese Annahme unhaltbar ist. Die eigentliche Elektronentheorie konnte erst entwickelt werden, nachdem durch die Forschungen von W. Crookes, Ph. Lenard, J. J. Thomson etwa 1898 das Vorhandensein von negativen Elektrizitätsmengen in bestimmten kleinsten Mengen — Elementarquanten oder Quanten, Elektronen (J. Stoney) — nachgewiesen war. Die Messungen von J. J. Thomson und H. A. Wilson haben dann zuerst direkt die elektrische Ladung dieses Elektrizitätsatoms gegeben, und die überraschenden Tatsachen der Radioaktivität (vgl. den Artikel „Radioaktivität") haben endgültig das Vorhandensein freier diskreter Elektronen oder Quanten negativer Elektrizität bewiesen. Die andere Grundlage der Elektronentheorie bilden die Prinzipien und Sätze der kinetischen Gastheorie (vgl. den Artikel „Kinetische Theorie der Materie"). Die von Krönig und Clausius begründete, von Maxwell und Boltzmann mit größter mathematischer Schärfe ausgebaute Theorie der Bewegungen (kinetische Theorie) der freien Atome und Moleküle, die ein Gas bilden, war einige Zeit, etwa von 1895 bis 1905, außer Mode gekommen, weil manche physikalisch-chemische Tatsachen sich kürzer und präziser durch einfache thermodynamisch-energetische Betrachtungen ableiten ließen. Die Nützlichkeit der anschaulichen kinetischen Betrachtungen und die Notwendigkeit, Diskontinuität in der Materie und in der Elektrizität anzunehmen, trat aber bald wieder klar hervor, namentlich als man die oben erwähnten Tatsachen aus der Elektrizitätsleitung in Gasen zu erklären suchte. Auch die Strahlungstheorie, wie M. Planck sie 1906 entwickelt hat, führte wieder zu statistischen oder Wahrscheinlichkeitsbetrachtungen und zur Annahme eines Elementarquantums der Elektrizität zurück. Dabei hat M. Planck die Grundannahmen für die Wahrscheinlichkeitsbetrachtungen erheblich erweitert und die Theorie der sogenannten Energiequanten begründet.

1898 hat zuerst E. Riecke beide Theorien, Existenz freier Elektronen und kinetische Gastheorie, vereinigt und die Eigenschaft eines Gases theoretisch studiert, dessen kleinste Teile negative Elektrizitätsatome oder Elektronen sind. Da aber ein derartiges Gas insgesamt eine gewaltige negative elektrische Ladung besitzt, so kann es nur gemischt mit positiven Elektrizitätsladungen existieren. Diese letzteren können, wie alle Versuche gezeigt haben, nicht von den Atomen getrennt werden. Demgemäß können freie Elektronen bei geringer Geschwindigkeit und in dauerndem (stationären) Zustand nur mit und in Materie existieren. — Substanzen, in denen Elektrizitätsmengen ohne Materie transportiert werden, sind, wie früher auseinandergesetzt, die Leiter; der Elektrizitätstransport erfolgt also durch Elektronen. Um dann dem Unterschied zwischen Isolatoren, Halbleitern und Leitern Rechnung zu tragen, sind zwei Annahmen möglich: 1. Nur frei bewegliche Elektronen besorgen die Elektrizitätsleitung; ihre Zahl ist verschieden und bedingt hauptsächlich den Unterschied in der Leitfähigkeit bei den verschiedenen Substanzen und Temperaturen. 2. Alle Elektronen können den elektrischen Strom leiten, nur ist ihre Beweglichkeit verschieden. — Die erste Annahme ist die der bisher eingehender mathematisch durchgebildeten Elektronentheorien. Die freien Elektronen können dem elektrischen Potentialgefälle auf mehr und minder kurze Strecken folgen und wandern wie die negativen Ionen nach der Anode. Hindernisse auf ihrem Weg sind die ruhenden Atome des festen Metalles. Diese letzteren haben, wie die Definition des festen Körpers verlangt, eine bestimmte Ruhelage, um die sie Schwingungen ausführen können.

Auf diese, soweit sie eben Elektronen verloren haben, positiv geladenen Atome stoßen die Elektronen und werden dann zum Teil festgehalten, zum Teil wieder zurückgeworfen oder mit Ablenkung (Scattering) durchgelassen.

Die Strecke, auf der die Elektronen sich frei bewegen können, bezeichnet man als mittlere Weglänge l. Auf dieser erfahren die Elektronen mit der Ladung e und der Masse m eine Beschleunigung b durch die

Digitized by Google

an den Leiter angelegte elektrische Potentialdifferenz, die pro 1 cm = X sei. Es ist mb = eX; die Geschwindigkeit c, die durch diese Beschleunigung entsteht, ist $c = \frac{b.\tau}{2}$ im Mittel in der Zeit τ, während der die Elektronen frei sind. Es sei dann v die Geschwindigkeit der Elektronen infolge der Wärmebewegung; diese ist nach allen Richtungen dieselbe, und ergibt, da sie sich gegenseitig aufhebt, keinen Strom. So gilt daher

$$v = \frac{l}{\tau} \quad \text{oder} \quad \tau = \frac{l}{v} \quad \text{und} \quad c = \frac{1}{2}\frac{X e}{m}\frac{l}{v}$$

Die Stromstärke des Stromes, der durch 1 qcm des Leiters hindurchgeht, ist die Elektrizitätsmenge, welche in der Zeiteinheit durch 1 qcm des Leiters wandert. Wenn N-Elektronen mit der Ladung e in 1 ccm vorhanden sind, so ist Ne die gesamte Elektrizitätsmenge in ccm, und wenn c ihre Geschwindigkeit in Richtung von X ist, so geht in 1 sec cNe durch 1 qcm hindurch.

Die elektrische Leitfähigkeit des ccm $\varkappa_0$ ist dem Widerstand W_0 des ccm umgekehrt proportional. Nach dem Gesetz von Ohm, angewandt auf den Leiter von der Länge 1 cm und dem Querschnitt 1 qcm, ist E = J . W,

$$E \text{ pro } 1 \text{ cm} = X; \; W_0 = \frac{1}{\varkappa_0}; \; J = Ne.c$$

also ist

$$\varkappa_0 = \frac{Ne.c}{X} = \frac{Ne}{X}\frac{1}{2}\frac{Xe}{m}\frac{l}{v} = \frac{{}^1/_2 Ne^2.l}{m.v}.$$

Durch etwas schwierigere Betrachtungen, auf die hier nicht eingegangen werden kann, erhält man für die Wärmeleitfähigkeit $k = {}^1/_3 N.l.v.\alpha$, worin α eine Größe ist, die zu der Wärmebewegung der Elektronen in Beziehung steht.

Man erhält dann für das Verhältnis Wärmeleitung: Elektrizitätsleitung

$$L = \frac{k}{\varkappa} = \frac{4}{3}\frac{m}{e}\cdot\frac{v^2}{e}.\alpha.$$

P. Drude hat 1900 die Theorie von Riecke ausgebaut und vereinfacht und eine bestimmte Annahme über die Größe von α gemacht. Er setzt die in der Bewegung der Elektronen enthaltene Energie $\frac{1}{2}mv^2$ bei einer bestimmten Temperatur gleich der von Gasmolekülen gleich αT. Er kann daher auch α aus der kinetischen Gastheorie übernehmen, deren Gleichungen $\alpha = 2{,}02.10^{-16}$ ergeben. $\frac{e}{m}$ ist für Elektronen nach den besten Werten der Kathodenstrahlen = $1{,}76.10^7$ in elektromagnetischen Einheiten, die Ladung e eines Elektrons nach den neuesten Beobachtungen und der Strahlungstheorie = $1{,}565.10^{-20}$ (elmagn.). Da $\frac{1}{2}mv^2 = \alpha T$, so ist $\frac{k}{\varkappa} = {}^4/_3\left(\frac{\alpha}{e}\right)^2 T$. $\frac{\alpha}{e}$ ist aber auch, wie M. Reinganum bemerkte, ohne Kenntnis absoluter molekularer Größen aus Daten bei der Elektrolyse genau zu ermitteln $= 1{,}091.10^4$ und $\frac{k}{\varkappa} = 2{,}274.10^8.T$ in elektromagnetischen Einheiten.

P. Drude hat ferner auf derselben Grundlage noch die Theorie der Thermokraft, Peltierwärme, Thomsonwärme und der galvanomagnetischen Effekte im Anschluß an Riecke durchgeführt. H. A. Lorentz hat die gastheoretischen Begriffe noch schärfer gefaßt; er erhält für $\frac{k}{\varkappa} = {}^8/_9\left(\frac{\alpha}{e}\right)^2 T = 1{,}48.10^8.T$. Setzt man $T = 273^\circ + 18^\circ$, so ist bei 18° $\frac{k}{\varkappa} = 6{,}47.10^{10}$ nach Drude, $4{,}31.10^{10}$ bei Lorentz. Die gefundenen Zahlen für L sind (vgl. S. 357) von der Größe 7.10^{10}, also ungefähr gleich dem von Drude theoretisch gefolgerten Zahlenwert. Ferner müssen die $\frac{k}{\varkappa}$ proportional der absoluten Temperatur sein, also einen Temperaturkoeffizienten von ${}^1/_{273} = 3{,}67.10^{-3}$ haben, was ebenfalls zutrifft.

Diese erstaunliche Uebereinstimmung zwischen Theorie und Beobachtung wird wohl mit Recht als Beweis für die Richtigkeit der theoretischen Annahmen betrachtet. Erst bei tiefer Temperatur wird, wie Ch. H. Lees fand, die Uebereinstimmung schlechter. Man kann das erklären, wenn man die von Kamerlingh Onnes für niedrige Temperaturen aufgestellte Widerstandsformel annimmt; dann wird $\frac{k}{\varkappa} = \frac{8}{9}\left(\frac{\alpha}{e}\right)^2 T\left(1 - {}^1/_2\frac{\beta\nu}{T}\right)$. Das bedeutet, daß bei niedrigeren Temperaturen die Geschwindigkeit der Elektronen kleiner wäre als es der Gastheorie entspricht, und zwar verschieden in den einzelnen Metallen. Dann entgeht man auch gewissen Schwierigkeiten, die sonst der Verlauf der spezifischen Wärme bei niederen Temperaturen, wie ihn W. Nernst an Metallen fand, mit sich bringt. Doch ist die Frage, ob die Elektronen überhaupt einen Anteil an der spezifischen Wärme haben, noch strittig. Die zu hohen Werte von $\frac{k}{\varkappa}$ bei schlechtleitenden Metallen und namentlich bei Halbleitern finden in der sogenannten Isolatorwärmeleitfähigkeit der Atome wohl eine befriedigende Erklärung, namentlich nachdem für Diamant eine sehr hohe Isolatorwärmeleitfähigkeit festgestellt worden ist.

Um jetzt die Größe der elektrischen Leit-

Digitized by Google

fähigkeit allein zu berechnen, setzt man die oben angegebenen Werte für e, v, $\frac{e}{m}$ ein. Man entnimmt ferner v_e der Elektronen mit der Masse m_e der Beziehung $\frac{1}{2}m_e v_e^2 = \frac{1}{2}m_H v_H^2$, wobei v_H, m_H sich auf das Molekül des Wasserstoffgas beziehen, bei 18° C ist unter dieser Annahme v_H des Elektrons $= 1.10^7$.cm/sec. Die Zahl N der Elektronen im ccm ist zunächst unbestimmbar, und man erhält daher aus den sonst schon bekannten Daten $\left(\frac{m}{e}, e, v\right)$ und dem experimentell gemessenen Wert $\varkappa$ nur N.l. Wir können aber, wie P. Drude und M. Reinganum zeigten, aus den optischen Beobachtungen von E. Hagen und H. Rubens über das Reflexionsvermögen der Metalle in seiner Abhängigkeit von der Wellenlänge des auffallenden Lichtes und der Temperatur schließen, daß die mittlere Weglänge der Elektronen von der Größenordnung 1.10^{-7} cm ist. Dann erhalten wir z. B. für Silber $N = 5.10^{22}$, das ist, wie man beweisen kann, etwa $^1/_3$ der Zahl der Atome, so daß also in einem Moment von 3 Elektronen 2 gerade von Atomen festgehalten werden, während 1 frei beweglich ist. Derselbe Wert $^1/_3$ ergibt sich auch aus der Elektronentheorie des Halleffekts. Eine gewisse Schwierigkeit bei dieser Theorie ist die Tatsache, daß die elektrische Leitfähigkeit danach umgekehrt proportional $\sqrt{T}$ sein müßte, (denn v ist proportional $\sqrt{T}$), während sie angenähert umgekehrt proportional T ist. Man muß, um das zu erklären, die Weglänge l umgekehrt proportional $\sqrt{T}$ setzen.

Im Rahmen der Theorie 1 muß man für die Halbleiter, wie J. Koenigsberger zeigte, annehmen, daß die Elektronenzahl mit steigender Temperatur zunimmt, daß also die Elektronen von den Atomen abdissoziieren oder, was dasselbe ist, in den metallisch leitenden Zustand übergehen. Man erhält dann theoretisch die S. 355 gegebene Formel für die Abhängigkeit des Widerstandes von der Temperatur, und Q bedeutet die Wärme, die bei der Wiedervereinigung von Elektron und positivem Ion entsteht.

Für das Verhalten der Legierungen fehlt noch eine befriedigende Deutung. Die von C. Liebenow versuchte Erklärung bietet mannigfache Schwierigkeiten. Andere Deutungen sind von R. Schenk gegeben und von A. L. Bernoulli geprüft worden.

Eine Abänderung dieser Elektronentheorie erster Art ist die zweite Theorie von J. J. Thomson. Er nimmt eine Emission der Elektronen aus den Metallatomen an, einen Austausch der Elektronen von einem Atom zum anderen in bestimmter Richtung. Die Wärmebewegung, die in der ersten Theorie eine ungeordnete Elektronenbewegung bedingt, hat nach dieser Anschauung eine ungeordnete Verteilung der Achsen (Verbindungslinie Atom—Elektron) des Duplets Atom—Elektron zur Folge. Die elektrische Kraft eines Stromes wirkt dann drehend auf das System Atom—Elektron und bedingt dadurch eine vermehrte Elektronenaussendung nach einer Richtung. Um aber die Formel für die Wärmeleitung und das Gesetz von Wiedemann und Franz abzuleiten, muß J. J. Thomson ebenfalls annehmen, daß die kinetische Energie der ausgesandten Elektronen $\frac{1}{2}mv^2 = \alpha T$ wie bei Gasmolekülen ist. Daher ist kein prinzipieller Unterschied zwischen diesen und den früheren Annahmen vorhanden, und auch das Verhalten der Halbleiter, der Halleffekt, würde sich in derselben Weise erklären.

2. Die zweite Annahme wäre, daß die Zahl der Elektronen bei den verschiedenen Substanzen und Temperaturen nahezu dieselbe ist, daß aber die Elektronen an die Atome mehr oder minder stark gebunden und daher verschieden leicht beweglich sind. Man kann dann eine Aussendung der Elektronen nach allen Richtungen hin oder nach bestimmten Vorzugsrichtungen und auf Flächen annehmen. Diese Emission könnte von der Natur der Substanz und der Temperatur abhängen und dabei die Eigenenergie der Elektronen recht klein oder den Atomen entliehen sein. Die Theorie der Atomwärme würde dadurch einfacher, aber es entstehen Schwierigkeiten bei der Erklärung des Gesetzes von Wiedemann und Franz, und vor allem bei den flüssigen Metallen. Diese Theorie ist mathematisch noch nicht ausgearbeitet; es fehlen auch noch Experimente, die zwischen den Annahmen 1 und 2 entscheiden könnten.

Jedenfalls steht so viel fest, daß in festen Metallen und Halbleitern Elektronen allein, in flüssigen jedenfalls zum weitaus größten Teile die Träger der elektrischen Vorgänge sind, und zwar in der Zeit, in der sie sich von den Atomen losgelöst haben, und von einem Atom zum anderen wandern.

Literatur. *Werke allgemeinen Inhalts. Hier sind nur Werke in deutscher Sprache aufgeführt:* ***G. Wiedemann,*** *Elektrizität und Magnetismus. Bd. 1. Braunschweig 1893. —* ***L. Graetz,*** *Elektrizität. — Handbuch der Physik, herausg. v. A. Winkelmann. Bd. IV. Leipzig 1905. Artikel von* ***L. Graetz und F. Auerbach.*** *—* ***Müller-Pouillet,*** *Lehrbuch der Physik, Braunschweig 1907 ff. Von* ***W. Kaufmann*** *bearb. Abschnitt. —* ***E. Hoppe,*** *Geschichte der Elektrizität. Leipzig 1884. —* ***K. Baedeker,*** *Die elektrischen Erscheinungen in metallischen Leitern. Braunschweig 1911. —* ***F. Kohlrausch und L. Holborn,*** *Leiter-*

Digitized by Google

mögen der Elektrolyte. Leipzig 1898. — Elektrische Meßmethoden, vgl. insbesondere **F. Kohlrausch,** *Lehrbuch d. prakt. Physik. Leipzig 1909. — Elektrische Demonstrationsversuche, vgl. insbesondere* **R. Fricke,** *herausg. v.* **O. Lehmann,** *Physikalische Technik. Braunschweig. — Von der speziellen Literatur sind nur die nach 1860 erschienenen Abhandlungen angeführt, die vor 1860 haben mehr historisches Interesse, und sind in den obengenannten Werken zitiert. — Zu Abschnitt 1:* **E. Riecke,** *Phys. Zt.* **2,** *639. 1901. —* **F. Kohlrausch,** *Pogg. Annalen* **159,** *258. 1876. —* **Derselbe,** *Pogg. Ann. Jubelb. 1874. S. 290. —*

Zu 2: **F. Braun,** *Wied. Ann.* **19,** *340. 1883. —* **Derselbe,** *Pogg. Ann.* **153,** *556. 1874. —* **W. Kaufmann,** *Ann. Phys.* **2,** *158. 1900. —* **H. Th. Simon,** *Phys. Zt.* **6,** *297. 1905. —* **Patterson,** *Phil. Mag. (6)* **4,** *652. 1902. —* **J. C. Maxwell und Crystall,** *Report British Assoc. 1874. S. 36. —* **A. Gaugain,** *Ann. chim. phys. (3)* **63,** *261. 1861. —* **E. Cohn,** *Wied. Ann.* **21,** *646. 1884. —* **H. Clark,** *Journ. physique* **1,** *367. 1872. —* **J. Stark,** *Drude Ann.* **5,** *793. 1901. —*

Zu 3: **H. Paalzow und H. Rubens,** *Wied. Ann.* **37,** *529. 1889. —* **H. Th. Simon,** *Ann. Phys.* **64,** *233. 1898. —*

Zu 4: **R. Clausius,** *Pogg. Ann.* **104,** *650. 1858. —* **R. Bénoit,** *C. R.* **76,** *342. 1872. —* **A. Matthiesen und M. von Bose,** *Pogg. Ann.* **115,** *353. 1862. —* **J. Dewar und J. A. Fleming,** *Phil. Mag. (5)* **36,** *271, 1893;* **40,** *303, 1895. —* **W. Jäger und M. Diesselhorst,** *Abhdl. Phys. techn. Reichsanstalt* **3,** *269. 1900. —* **M. von Pirani,** *Verh. Dt. Phys. Ges.* **12,** *301. 1910. — Zu 4a:* **Kamerlingh Onnes und J. Clay,** *Comm. Physic. Labor. Leiden Nr. 95, 1906 und weiter Mitteilungen von Kamerlingh Onnes in den Communications. 1911 bis 1912. —* **W. Nernst,** *Sitzber. K. Preuß. Ak. Wiss., 311. Berlin 1911. —* **J. Clay,** *Bericht: Jahrb. f. Radio.* **8,** *383. 1912. —* **A. Bernini,** *Phys. Zt.* **3,** *241 u. 406, 1904;* **6,** *74, 1905. —* **J. Hopkinson,** *Proc. R. Soc. London* **45,** *457. 1889. —* **Le Chatelier,** *Journ. de Phys. (2)* **10,** *369. 1891. — Zu 4b:* **A. Matthiesen und M. Holzmann,** *Pogg. Ann* **110,** *190. 1860. —* **A. Matthiesen und C. Voigt,** *Pogg. Ann.* **116,** *369, 1862;* **122,** *19, 1864. —* **Le Chatelier,** *Bericht:* **W. Guertler,** *Jahrb. f. Radioakt.* **5,** *17. 1908. —* **C. Benedicks,** *Zt. f. phys. Chem.* **40,** *545. 1902. —* **Kurnakow,** *Zt. f. anorg. Chem.* **64,** *156. 1909. —* **R. Haas,** *Wied. Ann.* **52,** *673. 1894. —* **A. Eucken und G. Gehlhoff,** *Verh. Dt. Phys. Ges.* **14,** *169. 1912. —* **C. H. Weber,** *Wied. Ann.* **27,** *145. 1886. —* **A. Larsen,** *Ann. Phys.* **1,** *123. 1900. — Zu 4c:* **W. Hittorf,** *Pogg. Ann.* **84,** *1. 1854. —* **A. Matthiesen,** *Pogg. Ann.* **103,** *428. 1858. —* **H. Bäckström,** *Kgl. Vetenskap Akad. Stockholm 1894. S. 545. —* **F. Streintz,** *Ann. Phys.* **3,** *1, 1900;* **9,** *854, 1902. —* **J. Guinchant,** *C. R.* **134,** *1224. 1902. —* **J. Koenigsberger und O. Reichenheim,** *Phys. Zt.* **7,** *570. 1906. — Bericht:* **J. Koenigsberger,** *Jahrb. f. Rad.* **4,** *158. 1907. —* **F. Horton,** *Phil. Mag.* **11,** *505. 1906. —* **K. Baedeker,** *Ann. Phys.* **22,** *749. 1907. —* **E. van Aubel,** *Phys. Zt.* **4,** *551. 1903. —* **J. Koenigsberger und K. Schilling,** *Ann. Phys.* **32,** *179. 1910. —* **C. Doelter,** *Sitzber. K. K. Ak. Wien* **119,** *49. 1910. —* **Derselbe,** *Sitzber. K. K. Ak. Wiss. Wien* **120,** *49. 1911. —* **M. von Pirani und W. von Siemens,** *Zt. f. Elektrochem. 1909.* **15,** *969. —* **W. Dietrich,** *Diss. Göttingen 1909. — Zu 4d:* **E. Wiedemann,** *Pogg. Ann.* **154,** *318. 1874. —* **W. Kohlrausch,** *Wied. Ann.* **17,** *642. 1882. —* **L. Graetz,** *Wied. Ann.* **40,** *18. 1890. —* **B. Poincaré,** *Ann. Chim. Phys.* **21,** *289. 1890. —* **E. Warburg,** *Wied. Ann.* **21,** *622. 1884. —* **E. Warburg und E. Tegetmeier,** *Wied. Ann.* **32,** *442. 1887. —* **E. Haber und St. Tolluczko,** *Zt. f. anorg. Chem.* **41,** *407. 1904. —* **E. Rasch und W. Hinrichsen,** *Zt. f. Elektrochem.* **14,** *41. 1908. —* **W. Nernst,** *Zt. f. Elektrochem.* **6,** *41. 1899. —* **H. Reynolds,** *Inaug. Diss. Göttingen 1902. —* **E. Bose,** *Ann. Phys.* **9,** *164. 1902. —*

Zu 5a: **G. Wiedemann und R. Franz,** *Pogg. Ann.* **89,** *497. 1853. —* **H. Lorenz,** *Wied. Ann.* **13,** *422. 1882. —* **W. Jaeger und H. Diesselhorst,** *Abt. Phys. Techn. Reichsanst.* **3,** *282. 1900. —* **J. Koenigsberger,** *Phys. Zt.* **8,** *237. 1907. —* **Ch. Lees,** *Phil. Trans. Roy. Soc. London* **208,** *440. 1908. — Zu 5b:* **W. Smith,** *Sill. Jour.* **5,** *301. 1873. —* **W. Siemens,** *Pogg. Ann.* **159,** *117. 1876. —* **A. Korn,** *Phys. Zt.* **8,** *118. 1907. —* **R. Marc,** *Die physik.-chem. Eigenschaften des Selens. Hamburg 1907. —* **M. Sperling,** *Inaug. Diss. Göttingen 1908. —* **G. F. Jaeger,** *Zt. f. Kryst.* **44,** *45. 1907. —* **H. von Martin,** *Phys. Zt.* **12,** *41. 1911. —* **Sv. Arrhenius,** *Ber. Wien. Akad. Wiss.* **46,** *831. 1888. —* **H. Scholl,** *Ann. Phys.* **16,** *193 und 417. 1905. —* **G. Rudert,** *Ann. Phys.* **31,** *559. 1910. —* **K. Baedeker,** **29,** *556. 1909. —* **P. Lenard und S. Saeland,** *Ann. Phys.* **28,** *494. 1909. — Zu 5c:* **O. Chwolson,** *Bull. Acad. Imp. Petersburg* **27,** *187. 1881. —* **E. Lisell,** *Vetenskap. Förh. Stockholm* **55,** *697. 1898. —* **W. E. Williams,** *Phil. Mag.* **13,** *635. 1907. —* **F. Montèn,** *Arkiv f. matem. Fysik* **4,** *31, 1908, Upsala. —* **B. Beckmann,** *Inaug.-Diss. Upsala 1911. —* **A. Lafay,** *Compts Rendus Acad. Paris* **149,** *566. 1909. —* **A. Mousson,** *Schweiz. Gauzeitung. —* **W. Thomson,** *Nature* **17,** *180. 1878. —* **G. Tammann,** *Nachr. K. Ges. Wiss. Göttingen, 11. März. 1911. —* **E. B. Rosa und H. D. Babcock,** *The Electrician* **59,** *339. 1907. — Zu 5e:* **G. Quincke,** *Wied. Ann.* **59,** *476. 1896. —* **L. Heydweiller,** *Verh. Dt. phys. Ges.* **16,** *32. 1896. —* **L. Graetz,** *Ann. Phys.* **1,** *530. 1900. — Zu 5f:* **G. Wiedemann,** *Pogg. Ann.* **87,** *321. 1852. —* **C. Freund,** *Wied. Ann.* **7,** *58. 1879. —* **G. Quincke,** *Pogg. Ann.* **113,** *513. 1861. —* **Derselbe,** *Pogg. Ann.* **107,** *1. 1859. —* **F. Zöllner,** *Pogg. Ann.* **148,** *640. 1873. —* **E. Dorn,** *Pogg. Ann.* **160,** *56. 1877. —* **H. Helmholtz,** *Wied. Ann.* **7,** *337. 1879. —* **E. Dorn,** *Wied. Ann.* **10,** *46. 1880. —* **A. Coehn,** **64,** *217. 1898. —* **G. Bredig,** *Phys. Zt.* **2,** *508. 1900. —* **F. Braun,** *Wied. Ann.* **42,** *450, 1891;* **44,** *470, 1891. —*

Zu 6: **G. Kirchhoff,** *Ges. Abhdlg. Leipzig 1882. S. 1 bis 78. —* **H. Helmholtz,** *Wissensch. Abhdlg.* **1,** *429 bis 629. Leipzig 1882. —* **J. Cl. Maxwell,** *Lehrbuch, Elektrizität u. Magnetismus. Berlin 1883. S. 415 bis 466. —* **Rayleigh,** *Trans. Roy. Soc. 1871. S. 77. —*

Zu 7: **W. Weber,** *Werke,* **4.** *S. 91. 1862. —* **E. Riecke,** *Ann. Phys.* **66,** *353, 1898 u. Zt. f. Elektrochem.* **15,** *473, 1909. —* **P. Drude,** *Ann. Phys.* **1,**

Digitized by Google

566. 1900. **14,** *936. 1904.* — **M. Reinganum,** *Ann. Phys.* **2,** *398, 1900;* **16,** *958. 1905. Phys. Zt.* **10,** *355. 1909.* — **H. A. Lorentz,** *Proc. Acad. Amsterdam* **7,** *458, 585, 684. 1905.* — **W. Nernst,** *Berl. Ber.* **12,** *247, 1910.* — **E. Hagen und H. Rubens,** *Ann. Phys.* **11,** *873. 1903.* — **J. Koenigsberger und K. Schilling,** *Ann. Phys.* **32,** *179. 1910.* — **P. Debye,** *Ann. Phys.* **33,** *441. 1910.* — **N. Bohr,** *Studier over Metallernes Elektrontheori. Köbenhavn 1911.* — **J. J. Thomson,** *Korpuskulartheorie d. Materie. Braunschweig 1908.* — **R. Schenck,** *Zt. f. Elektrochem.* **15,** *649. 1909.* — **A. L. Bernoulli,** *Vgl. Literatur im Bericht Jahrbuch f. Radio.* **9,** *270. 1912.*

J. Koenigsberger.

Elektrizitätsleitung in Gasen.

1. Einleitender Abschnitt. Gase in normalem Zustand. 2. Aenderung der Leitfähigkeit der Gase durch Bestrahlen. Unselbständige Strömung: a) Verlust der erworbenen Leitfähigkeit. b) Der Strom im Gase: Die drei Stadien der Stromspannungskurven: α) Ionisation und Potentialverteilung im Stadium I. β) Ionisation und Potentialverteilung im Stadium II. γ) Ionisation und Potentialverteilung im Stadium III. c) Beweglichkeit und Wanderungsgeschwindigkeit: α) Verhältniszahl der Beweglichkeiten aus dem Potentialgefälle. β) Bestimmung der absoluten Größen der Beweglichkeit. γ) Direkte Messung der Wanderungsgeschwindigkeiten. Luftstrommethode. Methode des Wechselfeldes. d) Die Diffusion der Ionen. e) Die Rekombination der Ionen. f) Die Natur der Ionen in Gasen. g) Die direkte Messung der Ionenladung. 3. Feldentladung. Selbständige Strömung: a) Nichtleuchtende Feldentladung. b) Leuchtende Feldentladung. c) Glimmentladung. d) Funkenentladung. e) Bogenentladung. 4. Charakteristik und Stabilität.

1. Einleitender Abschnitt. Gase in normalem Zustand. Die Elektrizitätsleitung eines Gases in normalem Zustand ist sehr gering. Die ersten Versuche, ihre Existenz nachzuweisen, gehen auf Coulomb zurück. Coulomb konnte im Jahre 1785 zeigen, daß ein positiv oder negativ aufgeladener Leiter, der von einem Gase umgeben ist, seine Ladung verliert. Dieser Verlust ließ sich nicht durch Unvollkommenheit der Isolation der Aufhängung erklären. Coulomb stellte die Hypothese auf, daß die Moleküle des Gases, die mit dem geladenen Leiter in Kontakt kommen, sich gleichnamig aufladen; die Folge wäre, daß sie abgestoßen würden, so die Ladung zu den Wänden forttragen, und auf diese Weise den Elektrizitätsverlust bedingen.

Der Coulombsche Nachweis der Elektrizitätsleitung ist richtig; seine Erklärung ist es jedoch nicht. Denn wenn sie richtig wäre, müßte ein geladener Leiter, der in einem geschlossenen Gefäße, dessen Wände leitend mit der Erde verbunden sind, aufgehängt ist, um so leichter seine Ladung verlieren, je geringer der Abstand zwischen Gefäßwand und Leiter ist. Dies widerspricht dem tatsächlichen Verhalten. Geitel und Wilson zeigten nämlich, daß der Elektrizitätsverlust um so geringer ist, je kleiner das Gefäß ist, in welchem sich der geladene Leiter befindet.

Die richtige Erklärung dieser Erscheinung, die schon im Jahre 1850 von Mateucci beobachtet war, aber keine Beachtung gefunden hatte, sowie die der Elektrizitätsleitung der Gase im allgemeinen, ist erst ein volles Jahrhundert nach Coulomb erbracht worden. Erst als man nach Entdeckung der Kathoden-, Röntgen- und Radiumstrahlen in diesen die Mittel gefunden hatte, die Leitfähigkeit der Gase durch Einwirkung von außen (ohne Temperaturerhöhung) zu ändern, gelang es, das Wesen der Leitfähigkeit der Gase systematisch zu ergründen.

Woher die Leitfähigkeit der Luft in abgeschlossenen Gefäßen kommt, läßt sich für die ganze Leitfähigkeit nicht mit Sicherheit angeben. Ein Teil derselben ist einer sehr durchdringenden äußeren Strahlung, die auf der Erde überall vorhanden ist, zuzuschreiben. Rutherford und Cooke stellten fest, daß sich die Leitfähigkeit auf 70% ihres Originalwertes reduzierte, wenn Bleiumhüllungen von 5 cm Dicke das Luftvolumen umgaben, daß aber weitere Vermehrung der Dicke der Hülle keinen Einfluß auf die Leitfähigkeit mehr hatte. — Interessant, aber nicht aufgeklärt, ist die von Elster und Geitel festgestellte Tatsache, daß ein völlig abgeschlossenes Luftvolumen seine Leitfähigkeit spontan verändert, nach 4 Tagen etwa viermal so stark leitet, als nach seiner Abschließung, und schließlich einen konstanten Wert erreicht, der fünfmal so groß ist als der Anfangswert.

2. Die Aenderung der Leitfähigkeit der Gase durch Bestrahlung. Unselbständige Strömung. Die Kathodenstrahlen, die Röntgenstrahlen und die Strahlen der radioaktiven Stoffe sind imstande, die Leitfähigkeit der Gase zu steigern. Der Nachweis dieser Eigenschaft der Strahlung läßt sich etwa mit Hilfe einer Anordnung nach dem Schema der Figur 1 erbringen.

A ist ein Bleikasten, der die Strahlen nur durch eine Oeffnung O, die mit Aluminiumblech zugedeckt ist, hindurch läßt. Die Strahlen dringen von hier in den Glastrichter T. Die in ihm befindliche Luft wird während der Bestrahlung oder kurz nachher auf ihr Leitvermögen untersucht, indem man sie aus dem bestrahlten Gefäß

Digitized by Google

hinausbläst, und sie durch eine Röhrenleitung R in ein geladenes Elektroskop hineinstreichen läßt. Durch diese Anordnung ist ein direkter Einfluß der Strahlung auf das Elektroskop vermieden, und es ist erreicht, daß lediglich die in das Elektroskop hinein gepumpte Luft einen Einfluß auf dessen Ladungszustand ausübt. So läßt sich leicht nachweisen, daß infolge der Bestrahlung die Luft leitend wird.

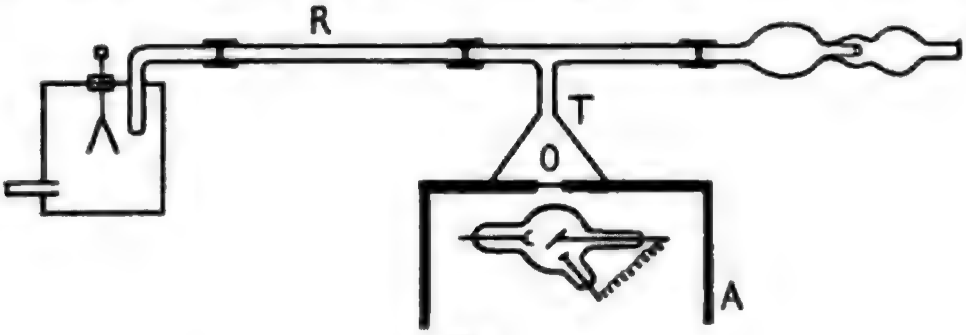


Fig. 1.

2a) Verlust der erworbenen Leitfähigkeit. Mit derselben Anordnung läßt sich zeigen, daß auf verschiedene Weise der durch Strahlung leitend gemachten Luft die Leitfähigkeit wieder genommen werden kann. Dies tritt ein:

1. wenn die Luft ein elektrisches Feld passieren muß, etwa einen elektrisch aufgeladenen Luftkondensator;

2. wenn die Luft durch enge Pfropfen von Glaswolle, die in das Rohr R gestopft sind, hindurchtreten muß, oder auf dem Wege zum Elektroskop gezwungen ist, durch Wasser hindurch zu perlen;

3. wenn der Weg der bestrahlten Luft sehr lang ist oder wenn eine beträchtliche Zeit zwischen Hindurchpumpen und Bestrahlung verstrichen ist.

Aus 1 bis 3 folgt, daß die Leitfähigkeit einer Beimengung des Gases zuzuschreiben ist, die durch Filtration (2) oder Abwarten (3) oder durch ein elektrisches Feld (1) entfernt werden kann. — Nun hat aber das Gas als ganzes keine Ladung, denn ein ungeladener Körper lädt sich nicht auf, wenn er in Berührung mit dem leitenden Gase gebracht wird. Andererseits zeigt die Einwirkung des elektrischen Feldes auf das Gas, daß Ladungen im Gase vorhanden sind. Hieraus folgt: Die Leitfähigkeit des Gases muß bedingt sein durch elektrisch entgegengesetzt geladene Teile des Gases, die jeweilig gleiche, aber entgegengesetzte Gesamtladungen tragen.

Die Entladung eines aufgeladenen Leiters, etwa eines Elektroskops, hat man sich danach so vorzustellen, daß im Falle der negativen Aufladung die positiven Teile des Gases vom negativen Leiter angezogen werden, und daß hierdurch die Aufladung neutralisiert wird. Die mit dem Leiter gleichnamig geladenen Teile können diesen Entladungsvorgang nicht aufhalten, weil sie an den Konduktor infolge seines abstoßenden Feldes nicht heran können. Man bezeichnet die geladenen Teile des Gases als „Ionen", das Gas nennt man „ionisiert". Diese Ausdrücke sind der Elektrolyse entlehnt; es soll aber hiermit nur zum Ausdruck gebracht werden, daß man es wie in der Elektrolyse mit geladenen Teilen zu tun hat, die im elektrischen Felde zu „wandern" imstande sind. Ueber die Identität der Ionen selbst mit denen der Elektrolyse oder über die Gleichartigkeit des Vorganges der Ionenbildung, der „Ionisation", soll hierdurch nichts gesagt sein.

Da die Moleküle des Gases in fortgesetzter Bewegung sind, so müssen Zusammenstöße sowohl der Moleküle untereinander, als auch der Moleküle mit den Ionen, als auch der Ladungen untereinander erfolgen. Hierdurch werden die Ionen sich allmählich neutralisieren; zwei entgegengesetzt geladene Ionen, die zusammenstoßen, können einen neutralen Körper bilden, indem sie sich „rekombinieren" oder „wiedervereinigen". Das Experiment 2 und 3 beruht offenbar zu einem Teil auf einer solchen „Rekombination"; zum anderen läßt es sich dadurch erklären, daß die Ionen an die geerdete Wand gelangen, und so infolge von „Diffusion an die geerdete Wand" ihre Ladung verlieren.

2b) Der Strom im ionisierten Gase. Die Möglichkeit, dem Gase die Leitfähigkeit durch ein elektrisches Feld zu entziehen, die durch obiges Experiment 1 erwiesen ist, zeigt, daß ein solches Feld eine Strömung der Ionen im Gase bewirkt, durch welche die Ionen aus dem Gase heraus gezogen werden. Es wandern hierbei offenbar die + Ionen zur — Platte, die — Ionen zur + Platte des Kondensators.

Untersucht man nun die Abhängigkeit der Strömung im Gase von der Stärke des elektrischen Feldes zwischen den Konden-

satorplatten, indem man die elektrische Spannung zwischen den Platten, von geringen EMK. anfangend, steigert, und bei konstanter Bestrahlung den Stromwert, der zu jeder angelegten Spannung gehört, feststellt, so ergibt sich die in Fig. 2 dargestellte Abhängigkeit der Strömung im Gase von der Spannung, die man ihrem Charakter nach in 3 Abschnitte zerlegen wird:

I. Bei geringen Spannungen steigt der Strom direkt proportional der angelegten EMK, d. h. es gilt das Ohmsche Gesetz.

II. Bei weiterer Steigerung hört die Proportionalität auf: der Strom wächst weniger schnell, als der Zunahme der Spannung entspricht, und wird schließlich konstant, d. h. er hört ganz auf zuzunehmen, trotz weiterer Steigerung der Spannung.

III. Diese Unabhängigkeit von der Spannung ist jedoch an eine gewisse Grenze gebunden. Wird diese überschritten, so findet man von einer bestimmten EMK an einen sehr schnellen Anstieg des Stromes mit der Spannung. Dieser Anstieg erfolgt viel schneller als dem Ohmschen Gesetz entspricht.

Die Figur 2 zeigt den Verlauf der Strom-

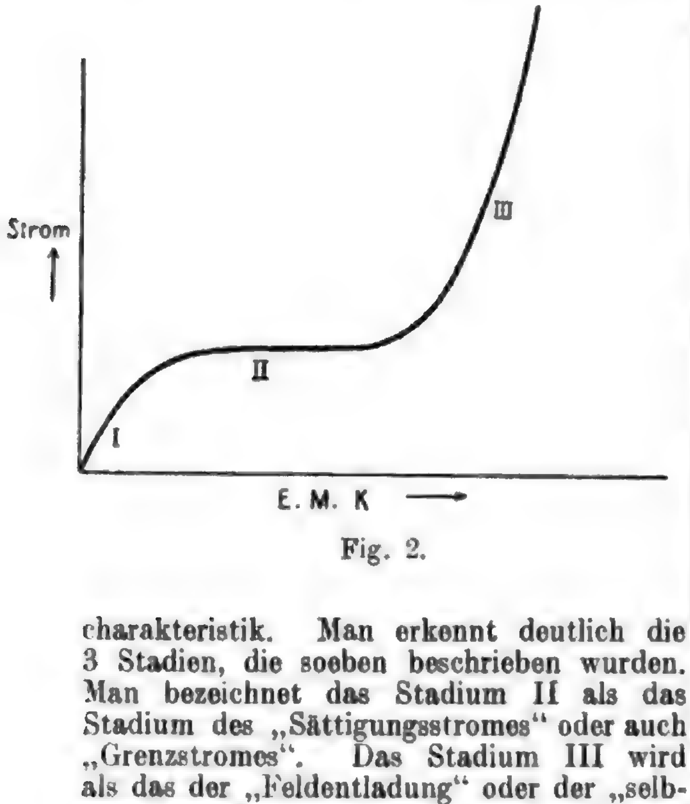


Fig. 2.

charakteristik. Man erkennt deutlich die 3 Stadien, die soeben beschrieben wurden. Man bezeichnet das Stadium II als das Stadium des „Sättigungsstromes" oder auch „Grenzstromes". Das Stadium III wird als das der „Feldentladung" oder der „selbständigen Strömung" oder der „Ionisation durch Stoß" bezeichnet.

Das Ohmsche Gesetz in Flüssigkeiten oder in Gasen wird dadurch kinematisch erklärt, daß man die Beschleunigung, die einem Ion durch die EMK. der Elektroden erteilt wird, durch die Reibung als vernichtet ansieht, die das Ion durch den Zusammenstoß mit den neutralen Molekülen erleidet. Nur bei Vernichtung der Beschleunigung durch Reibungsarbeit ist eine direkte Proportionalität zwischen Strom und Spannung zu erwarten. Für diesen Fall ergibt sich die Bewegung des Ions als lediglich bestimmt durch die Stärke des Feldes an der Stelle zwischen den Kondensatorplatten, an denen sich das Ion gerade befindet. Bewegt sich das Ion im Vakuum, so gilt das Ohmsche Gesetz nicht. In diesem Falle ist die Bewegung des Ions lediglich abhängig von der beschleunigenden Kraft, die durch das Feld auf das Ion ausgeübt wird. Alsdann fliegt das Ion im Felde 0 mit der Geschwindigkeit weiter, zu der es durch das Feld beschleunigt wurde, während es im Falle der Gültigkeit des Ohmschen Gesetzes im Felde 0 die Geschwindigkeit 0 haben würde.

α) Ionisation und Potentialverteilung im Stadium I. Aus der Gültigkeit des Ohmschen Gesetzes im Stadium I ist demnach zu schließen, daß die Geschwindigkeit des Ions der angelegten EMK proportional ist. Ist die Ladung eines Ions e und werden n Ionen pro Kubikzentimeter des Gases in der Sekunde erzeugt, ist ferner die Geschwindigkeit eines Ions im Felde von einem Volt/cm, die sogenannte „Beweglichkeit", gleich v, so ist der Strom J, der pro Quadratzentimeter Elektrodenquerschnitt im Gase fließt:

$$J = \frac{n.e.v.E}{l}.$$

Hier bedeutet E die Anzahl der Volt, l die Entfernung der Elektroden, und es ist nur eine Geschwindigkeit der Ionen angenommen. Sind Ionen von zweierlei Vorzeichen vorhanden, welche die Beweglichkeiten u_1 und u_2 haben und die Ladung e tragen, so wird:

$$J = \frac{n.e(u_1 + u_2)E}{l}.$$

Es ist hier also bei kleinen EMK. ausgedrückt, daß die Stromstärke der Kraft proportional ist.

Ist der Querschnitt der Platten nicht 1 qcm, sondern F qcm groß, so wird der Strom bei gleichmäßiger Volumenionisation

$$J = \frac{n.e.F.(u_1 + u_2)E}{l}.$$

β) Ionisation und Potentialverteilung im Stadium II. Aus dem Vorhergehenden ist klar, daß der Strom, der zwischen den Platten fließt, direkt abhängig ist von der Anzahl der Ionen, die an den Elektroden abgeschieden werden. Es braucht kaum gesagt zu werden, daß nicht mehr Ionen in der Sekunde abgeschieden werden können, als in der Sekunde erzeugt wurden. Werden also durch die vorhandene EMK alle Ionen,

Digitized by Google

die im Gase sind, abgeschieden, so kann eine Steigerung der EMK. keine Steigerung des Stromes mehr bedingen. In diesem Falle ist „Sättigungsstrom" vorhanden, und der Strom wird, wie Stadium II anzeigt, unabhängig von der Spannung. Die Strömung selbst wird demnach ganz unabhängig von der Beweglichkeit der Ionen, d. h. von ihrer Geschwindigkeit im Gefälle 1. Lediglich eine Vergrößerung der Ionenzahl kann eine Vergrößerung des Stromes herbeiführen.

Hieraus folgt ein auf den ersten Blick sehr paradox erscheinendes Verhalten des Sättigungsstromes im Falle der gleichmäßigen Ionisation des ganzen Gasvolumens. Ist die Entfernung der Platten zunächst 1 und wird sie dann auf l vergrößert, so wird hierdurch das zwischen den Platten befindliche Gasvolumen und hiermit die Zahl der Ionen zwischen den Platten direkt proportional mit dem Volumen des Gases zwischen den Platten vergrößert. Infolgedessen wächst der Strom J nach der Gleichung:

$$J = F.l.n.e.$$

Die Stromstärke nimmt hier also zu, wenn man die Gasstrecke, die im Stromkreise selbst den „Widerstand" bildet, vergrößert. Man sieht hieraus, daß man nicht von einem „Widerstand des Gases" in dem Sinne sprechen kann, wie dies sonst in der Elektrizitätsleitung geschieht. — Die Bestimmung des Sättigungsstromes in einem Gase ist von großer Wichtigkeit, wenn man die Stärke der Ionisation im Gase bestimmen will. Das Potential, welches nötig ist, um Sättigungsstrom zu erreichen, ist von der Natur des Gases, der Stärke der Ionisation, dem Gasdruck, der Plattengröße und der Plattenentfernung abhängig.

Bei gegebener Strahlungsintensität nimmt die Sättigungsspannung schnell ab bei Erniedrigung des Gasdrucks. Es sind zwei Ursachen, die dieses Resultat herbeiführen. Erstens die Abnahme der Ionenzahl mit dem Druck, und zweitens die Steigerung der Ionengeschwindigkeit bei Abnahme des Drucks Hierdurch wird notwendig sehr viel schneller Sättigung erreicht, weil seltener Rekombinationen eintreten, und die Zeit, während der die Ionen sich zwischen den Platten befinden, kürzer ist; z. B. wird für eine gegebene Strahlungsintensität in Wasserstoff leichter Sättigung erreicht als in Luft, weil die Ionisation geringer, die Geschwindigkeit außerdem größer ist. Andererseits erfordert Kohlensäure eine größere Sättigungsspannung als Luft, da die Ionisation stärker und die Geschwindigkeit geringer als in Luft ist.

Diese Resultate sind nur für den Fall zutreffend, daß eine gleichmäßige Ionisation durch die Bestrahlung stattfindet. Ist dies nicht der Fall, und erfolgt nur in einer ganz dünnen Schicht an einer der Platten die Ionisierung, so wird sich bei Entfernung der Platten die Ionenzahl zwischen diesen nicht mehr ändern: Im Falle der Oberflächenionisation wird der Sättigungsstrom unabhängig von der Plattenentfernung.

Hierbei ist alsdann noch die weitere Eigentümlichkeit zu erwähnen, daß der Strom nur von Ionen eines Vorzeichens getragen werden kann und zwar des Vorzeichens, das gleich dem der bestrahlten Platte ist.

Die Potentialverteilung bei Sättigungsstrom. Dem Einsetzen des Sättigungsstromes geht eine Veränderung in der Verteilung der Feldstärke, gegenüber derjenigen im Stadium I, parallel. Im Falle der Gültigkeit des Ohmschen Gesetzes ist das Feld zwischen den Platten nahezu gleichförmig. Wenn aber Sättigungsstrom einsetzt, so wächst der Potentialfall, falls die Ionenzahl nicht äußerst gering ist, in der direkten Nachbarschaft der Elektroden, während er zwischen den Platten abnimmt. Die folgende Figur zwigt den Verlauf, wie er zuerst von Child und Zeleny beobachtet worden ist.

Figur 3 stellt den Potentialfall dar im

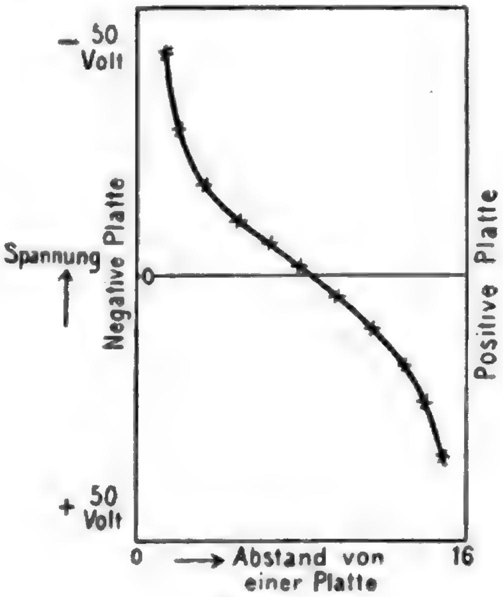


Fig. 3.

Falle von Volumionisation bei Sättigungsstrom. Die Kurve des Potentialverlaufs ist eine Wendepunkt-Kurve. Im Falle der Oberflächenionisation ist kein Wendepunkt vorhanden.

γ) Ionisation und Potentialverteilung im Stadium III. Die Behandlung dieses letzten Stadiums wird Gegenstand des zweiten Teils der hier vorliegenden Darstellung

Digitized by Google

der Gasentladung sein. Hier sei nur bemerkt, daß, zur Erklärung der enormen Vermehrung der Ionen, die bei einem ganz bestimmten Potentialgefälle einzusetzen beginnt, man gezwungen ist, eine neue Hypothese über die Ionen-Erzeugung zu machen. J. J. Thomson und Townsend zeigten zuerst, daß die hier auftretenden Erscheinungen sich erklären lassen, wenn man annimmt, daß die Größe des im Stadium III erreichten Gefälles, die Ionen befähigt, dank der lebendigen Kraft, die sie in dem Gefälle erworben haben, neue Ionen zu bilden, wenn ein Zusammenstoß mit neutralen Molekülen erfolgt.

2c) Beweglichkeit und Wanderungsgeschwindigkeit. Als Wanderungsgeschwindigkeit bezeichnet man den Weg, den die Ionen in der Zeiteinheit zurücklegen. Wirkt hierbei auf das Ion das Feld von 1 Volt/cm, so wird diese Größe die „Beweglichkeit" des Ions genannt.

Die Beweglichkeit der verschiedenen Gasionen ist eine sehr verschiedene; auch hängt sie von dem Zustand des Gases ab, in welchem sich das Ion bewegt. Sie ist in feuchten Gasen geringer als in trockenen; sie ist vom Druck und von der Temperatur abhängig. Im allgemeinen ist sie für das negative Ion größer als für das positive. Die Messung dieser Beweglichkeit kann auf verschiedene Weise erfolgen. Die Methoden, die hierzu dienen, lassen sich in direkte und in indirekte einteilen. Sie sind zum weitaus größten Teil J. J. Thomson und seinen Schülern zu danken.

α) Verhältniszahl der Beweglichkeiten aus dem Potentialgefälle bei Sättigungsstrom. Es ist sehr beachtenswert, daß im Falle der Volumenionisation sich das Verhältnis der Ionenbeweglichkeit direkt aus der Kurve des Potentialgefälles bei Sättigungsstrom entnehmen läßt. Wie dies heraus kommt, ist ohne die hier zu vermeidenden Mittel der höheren, theoretischen Physik etwa durch folgende Ueberlegungen einzusehen: Wenn die Ionen in großer Menge durch die EMK. zu den Platten getrieben werden, so stauen sie sich an den Elektroden, und es bilden sich dort Anhäufungen, die an der positiven Platte ein negatives Polarisationsgebiet, an der negativen ein positives erzeugen. Die Schichtdicke dieser Polarisationsgebiete wird um so beträchtlicher sein, je schneller die Ionen zu den Platten getrieben werden, denn dadurch wird die Anzahl der Ionen, die nicht von der Elektrode sofort neutralisiert werden können, zunehmen. Dieses Anwachsen der Schichten kann aber nur so lange stattfinden, bis die Gebiete entgegengesetzten Vorzeichens zusammenstoßen. Da gleich viele Ionen jedes Vorzeichens vorhanden sind, und da jedes Ion die gleiche Ladung trägt, so wird die Verhältniszahl der sich ansammelnden Ionen, lediglich abhängig sein von dem Geschwindigkeitsverhältnis der beiden Ionenarten. Umgekehrt wird man aus dem Schichtdickenverhältnis das Verhältnis der Geschwindigkeiten entnehmen können. Wird in der Weise, wie es Figur 3 zeigt, der Potentialfall zwischen den Platten bei Sättigungsstrom aufgenommen, so zeigt, wie ersichtlich, der Potentialverlauf eine Krümmung an, die in der Nähe der Platten ein Maximum hat. Nach einem bekannten Satze von Poisson läßt sich nun aus der Stärke und der Ausdehnung der Krümmung direkt die Menge oder Dichte der freien Elektrizität an den Elektroden angeben: Es wird die Dichte gleich der Aenderung des Potentialfalles dividiert durch $4.\pi$. Die Figur 4 zeigt die auf diese Weise von Zeleny

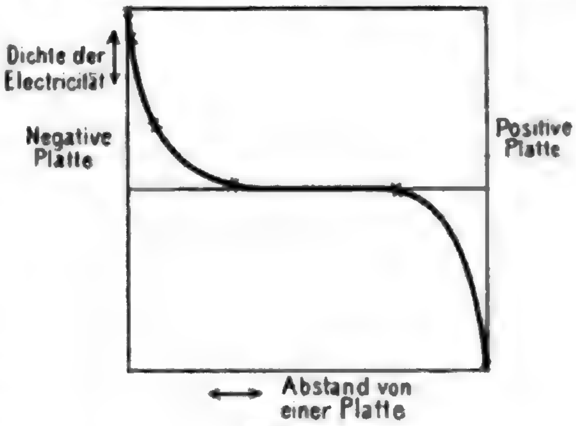


Fig. 4.

aus der Figur 3 erhaltene Schichtdicke und Mächtigkeit der freien Elektrizität im Falle der Potentialverteilung der Figur 3 an. Das Zusammenstoßen der Schichten entgegengesetzten Vorzeichens erfolgt nun, wie dies die Figur 3 zeigt, in einem Wendepunkt. Es werden sich demnach die Geschwindigkeiten der beiden Ionen verhalten wie die Abstände des Wendepunktes von den Platten. Es wird

$$1)\quad \frac{u_1}{u_2} = \frac{x}{l - x}$$

wo x die Entfernung des Wendepunktes von der positiven Platte bedeutet.

Auf eine prinzipiell wichtige Eigenschaft der Potentialkurve ist hier noch hinzuweisen: Wie man aus Figur 2 ersieht, ist die Krümmung der Kurve, ihrem Charakter als Wendepunktskurve entsprechend, an der negativen Platte konvex zur x-Achse, an der positiven konkav. Wie wir sahen befindet sich an der konvexen Seite positive, an der konkaven freie negative Elektrizität.

Man kann ganz allgemein aus dem Potentialgefälle, selbst bei dem sehr viel komplizierter liegenden Fall der Glimmentladung, einen Schluß auf die Elektrizitäts-

Digitized by Google

verteilung in der Röhre ziehen. Je nachdem die Potentialkurve konkav oder konvex zur x-Achse verläuft, sind entweder wahre Ladungen positiven, respektive negativen Vorzeichens vorhanden oder es läßt sich ein Schluß über das Verhältnis von Ionisation und Rekombination ziehen.

β) Die Bestimmung der absoluten Größen der Beweglichkeit. Um die absoluten Beweglichkeiten zu erhalten, ist noch eine zweite Beziehung für u_1 und u_2 erforderlich. Man erhält sie am einfachsten durch direkte Strommessung im Stadium I, das heißt durch Strommessung in dem Bereich der E-J-Kurve, in dem das Ohmsche Gesetz gilt, also Proportionalität zwischen Kraft und Strom vorhanden ist.

Alsdann ist:

$$2)\quad J = \frac{n(u_1+u_2)e.E}{l}$$

wenn n die Anzahl der wandernden Ionen eines Vorzeichens, e die Ladung, l die Plattenentfernung ist.

Um n.e zu bestimmen, verfährt man so, daß man unmittelbar nach der Bestrahlung, bevor die Ionen Zeit haben, sich zu rekombinieren, eine so große EMK. an eine der Platten anlegt, daß alle Ionen eines Vorzeichens, die durch die Bestrahlung frei gemacht werden, gegen die gegenüberstehende isolierte Platte, welche die Ladung 0 hat, getrieben werden. Hierdurch erhält die isolierte Platte eine Ladung, die elektrometrisch gemessen wird. Bei Kenntnis der Kapazität C des aufgeladenen Systems läßt sich n.e bestimmen, denn es gilt die Gleichung:

$$q = V.C = n.e$$

also

$$2')\quad J = \frac{V.C.E}{l}.(u_1+u_2).$$

Aus Gleichung 1 und 2 läßt sich natürlich u_1 und u_2 einzeln bestimmen.

γ) Direkte experimentelle Messung der Wanderungsgeschwindigkeiten. Luftstrommethode. Methode des Wechselfeldes. Die Methode der Messung, die im vorigen beschrieben wurde, ist keine direkte, da die Wanderungsgeschwindigkeiten erst aus dem Zusammenhang von Potentialmessung und Strommessung erhalten wurden. Eine sehr interessante direkte Methode wurde zuerst von Zeleny eingeführt, und später von verschiedenen Forschern, zum Teil etwas modifiziert, verwendet. Die Methode ist eine Luftstrommethode, die in folgendem besteht: Durch zwei Metallnetze, die auf verschiedenem Potential gehalten werden, wird ein Luftstrom von konstanter Stärke geblasen. Die eine Platte ist mit dem Elektrometer, die andere mit einer veränderlichen Spannung verbunden.

Ist im Schema der Figur 5 die Luft zwischen den Platten ionisiert, so wird das negative Ion durch das Gefälle zum Elektrometer getrieben. Ist nun die Kraft des Luftstroms, welcher dem Gefälle entgegenwirkt, stärker als die Kraft, welche das elektrische Feld auf das Ion ausübt, so kann das Ion nicht zu der Platte, die mit dem Elektrometer verbunden ist, gelangen, weil es gegen die Stärke des Luftstroms nicht an kann. Um eine Aufladung zu erhalten, muß man also entweder den Luftstrom abschwächen, oder man muß das Feld verstärken. Kennt man Feldstärke und Luftgeschwindigkeit, so erhält man direkt die Geschwindigkeit des Ions. — Ist der Luftstrom konstant und legt man einmal +, das andere Mal — Volt an die Platte B, so wird die Stärke des Feldes, die notwendig ist, um eine Aufladung von A zu erhalten, im Falle + und — verschieden sein, wenn die Beweglichkeit der Ionen verschiedenen Vorzeichens verschieden ist. Ist V die Geschwindigkeit des Luftstroms, so ist im Falle, daß man eine Aufladung von gleichem absolutem Betrage erhält, ob man nun + oder — Spannung anlegt,

$$Eu_1 - V = E'u_2 - V$$

wo E die Voltzahl bei positiver Aufladung der Platte A, E' die Voltzahl bei negativer Aufladung bedeutet;

also ist

$$\frac{u_1}{u_2} = \frac{E'}{E}$$

In diesem Falle erhält man also, ohne die absolute Geschwindigkeit des Luftstromes zu kennen, das Verhältnis der Wanderungsgeschwindigkeiten.

Wenn man direkt die Stärke des Luftstroms mißt, die gerade bewirkt, daß kein Ion mehr zur Platte gelangt, so hat man

$$u = \frac{V}{E}$$

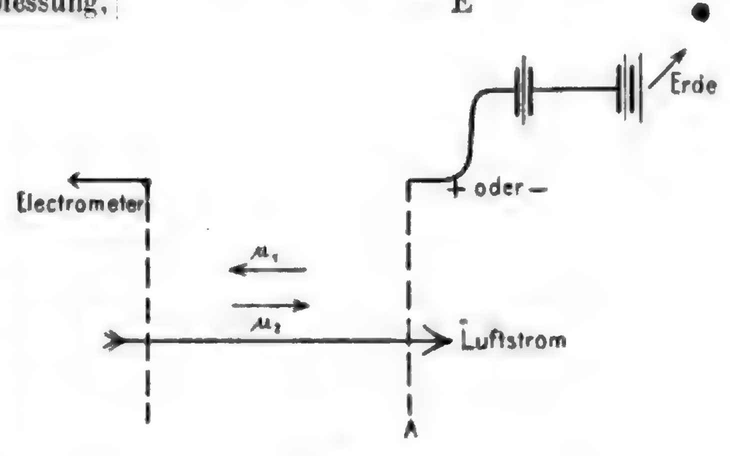


Fig. 5.

Digitized by Google

Man erhält also direkt die absolute Größe der Wanderungsgeschwindigkeit.

Methode des Wechselfeldes. Eine sehr genaue Methode, die Wanderungsgeschwindigkeit zu messen, die dann angewendet werden kann, wenn die Ionen nicht gleichförmig zwischen den Platten, sondern in unmittelbarer Nähe einer Platte (an der Oberfläche) erzeugt werden, rührt von Rutherford her. Es wird hierbei eine bekannte EMK., die in der Sekunde eine ganz bestimmte Anzahl von Vorzeichenwechseln aufweist, die außerdem einen harmonischen Verlauf hat, d. h. sinusförmig verläuft, an die Platte B in der Figur 6 angelegt.

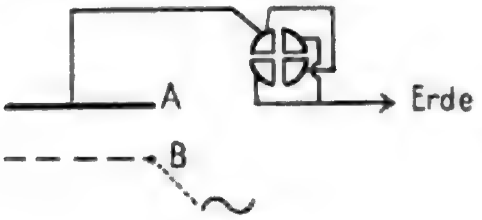


Fig. 6.

Wird etwa durch Bestrahlung mit ultraviolettem Licht negative Elektrizität an der Platte A frei, so kann das Elektrometer, das mit A verbunden ist, nur dann positiv geladen zurückbleiben, wenn der Abstand der Platten klein genug und die Kraft zwischen ihnen groß genug ist, um die von A kommenden Elektrizitätsträger hinreichend zu beschleunigen, um sie nach B gelangen zu lassen, bevor das beschleunigende Potential bei B sich in ein verzögerndes umgewandelt hat. Ist nämlich die EMK. während der Dauer einer halben Schwingung der Platte B nicht groß genug, um den negativen Elektrizitätsträgern die Geschwindigkeit zu erteilen, die zur Zurücklegung des Abstandes A bis B in der Zeit einer halben Schwingungsdauer erforderlich ist, so würden die von A kommenden Elektrizitätsträger wieder zu A zurückkehren, bevor sie B erreicht haben, da sie bei B in diesem Falle ein negatives, also ein abstoßendes Potential antreffen würden. Man würde also keine Aufladung des mit der bestrahlten Platte verbundenen Elektrometers erhalten können.

Ist die Potentialdifferenz zwischen den Platten zur Zeit $t = a \sin pt$, wo a die maximale Amplitude des Wechselstroms, p seine Frequenz bezeichnet, so ist die Geschwindigkeit des Ions in diesem Felde $= u \cdot \frac{a}{d} \sin pt$, wo d der Abstand der Platten ist. Die größte Distanz, die das Ion von der Platte erreichen kann, ist dann $= \frac{2 . u . a}{p . d}$. Wenn man demnach, bei Aenderung der Plattenentfernung beobachtet, bei welchem Plattenabstand eine Aufladung von A bei der Bestrahlung aufhört, so wird aus der Messung dieser Entfernung und der Kenntnis von a und p, die sich leicht bestimmen lassen, die Geschwindigkeit des Ions erhalten zu:

$$u = \frac{p . d^2}{2a}$$

Diese Methode setzt voraus, daß lediglich an der Oberfläche A, und nicht in dem Raum zwischen den Platten, der Sitz der Ionenerzeugung ist. Um diese Rutherfordsche Methode auch für den Fall der Volumenionisation zu verwenden, muß eine Modifikation der Methode eintreten. Man kann die Ionen in einem außerhalb des Raumes A bis B gelegenen Volumen erzeugen, und sie alsdann an die Innenseite einer netzförmigen Elektrode A durch Anlegung einer Hilfsspannung bringen. Auf diese Weise wurden von Franck und Pohl und von Franck Konstantenmessungen für eine Reihe von Gasionen ausgeführt. In folgender Tabelle sind die Wanderungsgeschwindigkeiten angegeben, die nach dieser oder einer der vorher beschriebenen Methoden erhalten wurden.

	u_1	u_2
He.	5,09	~ 100
H_2	6,74	7,95
N_2	1,27	~ 144
CO	1,10	1,14
O_2	1,36	1,80
Ar	1,37	~ 210
CO_2	0,76	0,81
N_2O	0,82	0,90
NH_3	0,74	0,80

In den chemisch trägen Gasen fallen die hohen Werte der negativen Ionen ins Auge, die von Franck erhalten wurden, als er gut gereinigte Gase untersuchte.

Einen tieferen Einblick in den Zusammenhang, der zwischen der Wanderungsgeschwindigkeit und der Natur des Ions besteht, erhält man aus der Beziehung, die zwischen ihr und der Diffusionsgeschwindigkeit besteht. Dies wird aus dem folgenden Abschnitt hervorgehen.

2d) Die Diffusion der Ionen. Wie bereits oben erwähnt, bezeichnet man als Diffusionskoeffizient D die Zahl, welche angibt, wieviel Ionen sich aus einem cm^3 des Gases in der Zeiteinheit durch den Querschnitt von einem cm^2 bewegen, wenn die Einheit der Kraft als Konzentrationsgefälle auf die Ionen wirkt. Die Widerstände, die das Ion bei der Bewegung unter der Einheit des Konzentrationsgefälles zu überwinden hat, sind bei gleichem Lösungsmittel genau die gleichen, wie sie es sind, wenn sich das Ion unter der Einheit des Potentialgefälles

Digitized by Google

bewegt. Während in letzterem Fall das elektrische Feld das Ion bewegt, ist es im Falle der Diffusion die Druckdifferenz.

Hiernach ist es leicht einzusehen, daß zwischen der Geschwindigkeit eines Ions unter der Einheit des Potentialfalls, und dem Diffusionskoeffizienten eine nahe Beziehung bestehen muß. Wenn N die Anzahl der Moleküle eines Gases im ccm bei einem Drucke π ist, so ergibt sich, wenn e die Ladung eines Ions bezeichnet, für den Zusammenhang zwischen Diffusionskoeffizient D und Beweglichkeit u, die Gleichung

$$u = D.\frac{N}{\pi}.e$$

Es ist also u direkt proportional mit D, so daß die Kenntnis einer dieser Größen uns in den Stand setzt, die andere zu berechnen. Andererseits ist klar, daß man bei direkter Messung von D und u die Größe Ne, das ist die Ladung der Ionen in einem ccm des Gases bestimmen kann. Mißt man schließlich auch noch die Ladung e, die einem einzelnen Ion anhaftet, so liefert die Beziehung direkt die Anzahl der Moleküle in einem ccm Gas bei Atmosphärendruck, die sogenannte Lohschmidtsche Zahl, die aus ganz anderen Ueberlegungen zuerst aus der kinetischen Gastheorie erhalten wurde. Ihre Wiedergewinnung auf dem hier angegebenen Wege gehört zu den interessantesten Resultaten der Methoden der Erforschung der Elektrizitätsentladung in Gasen.

Auch ohne direkte Bestimmung des Wertes der Ladung e ergibt sich aus den Messungen der Diffusionsgeschwindigkeit ein für die Erforschung des Gebietes außerordentlich wichtiges Ergebnis:

Wenn eine elektrische Kraft auf das ionisierte Gas wirkt, welche die Stärke 1 Volt hat, und der Druck gleich dem Atmosphärendruck oder 10^6 Dynen ist, so wird, da 1 Volt gleich $^1/_{300}$ ESE. ist

$$N.e = 3.10^8\,u/D.$$

Vergleicht man den Wert von N.e, den man so für die Ionen des Gases erhält, mit dem entsprechenden, bei der Elektrolyse des Wassers erhaltenen, so ergibt sich folgendes. Der Durchgang einer elektromagnetischen Einheit durch Wasser erzeugt in der Sek. 1,23 ccm H_2 bei 15° C und Atmosphärendruck. Die Zahl der Atome in diesem Volumen ist 2,46.N und wenn die Ladung des Wasserstoffatoms in der Elektrolyse ε ist, so ist

$$2{,}46.N.\varepsilon = 3.10^{10}E.S.E$$

$$\text{und}\quad N\varepsilon = 1{,}22.10^{10}E.S.E.$$

Demnach ist

$$e/\varepsilon = 2{,}46.10^{-2}u/D.$$

Setzt man die unter gleichen Bedingungen erhaltenen Werte von u und D ein, so ergibt sich das Verhältnis von e/ε sehr nahe gleich 1. Hieraus folgt: **Die Ladung der Gasionen ist die gleiche wie die der Ionen in der Elektrolyse, und ist die gleiche in allen Gasen.**

Die Beobachtungen über die Diffusion der Ionen wurden von Townsend nach folgender Methode angestellt. Townsend bestimmte die Diffusion der Ionen durch Röhrensätze verschiedener Länge; die hieraus erhaltenen Diffusionsgrößen in Abhängigkeit von der Länge der Röhren gestatten die Berechnung der Diffusionskoeffizienten. Das Prinzip der Messung besteht darin, daß der Verlust der Ionenladung des Gases nach Passierung der Röhren elektrometrisch festgestellt wird. Dieser Verlust ist, auch in engen Röhren, nicht allein durch die Diffusion der Ionen an die Wände bedingt. Ein Teil desselben ist auf Kosten der Rekombinationen zu setzen. Diese Größe mußte getrennt ermittelt werden.

In völliger Uebereinstimmung mit den Resultaten der Wanderungsgeschwindigkeitsmessung erwies sich der Diffusionskoeffizient der Ionen unabhängig davon, ob die Ionen durch Röntgenstrahlen, durch Radiumstrahlen oder durch ultraviolettes Licht erzeugt waren. Folgende Tabelle gibt die Diffusionskoeffizienten für einige Gase wieder.

Luft	trocken	$D_1 = 0{,}028$	$D_2 = 0{,}043$
	feucht	0,032	0,035
O_2	trocken	0,025	0,0396
	feucht	0,0288	0,0358
CO_2	trocken	0,23	0,026
	feucht	0,245	0,0255
H_2	trocken	0,123	0,190
	feucht	0,128	0,142

2e) Die Rekombination der Ionen. Auch die Rekombinationszahl der Ionen ist von verschiedenen Forschern, wie Townsend, Langevin und McClung direkt gemessen worden, und hat sich im Einklang mit den theoretischen Vorstellungen über ihr Zustandekommen ergeben. Die Zeit, die für dieselbe nötig ist, ist viel größer bei einer geringen vorhandenen Ionenmenge als bei einer großen Zahl vorhandener Ionen. Aus einigen Erscheinungen, wie z. B. der Tatsache, daß ein Sättigungsstrom viel schwerer zu erreichen ist, wenn die Ionisation durch α-Strahlen erzeugt wird, als im Falle der β- oder γ-Strahlenerzeugung, wollte Bragg schließen, daß die α-Strahlen eine geringere Ausgangsgeschwindigkeit für die negativen Träger bedingen, und deshalb letztere leicht wieder zum positiven Restatom zurückgezogen würden, woraus eine „Initialrekombination" resultieren würde. Neuere Arbeiten machen sehr wahrscheinlich, daß die erwähnte Schwierigkeit bei α-Strahlen, Sättigungsstrom zu erreichen, auf der Eigentüm-

Digitized by Google

lichkeit der α-Strahlen beruht, auf geradlinigen Bahnen sehr konzentrierte Ionisation zu erzeugen. Hierdurch sind die Ionen im Gase nicht gleichmäßig verteilt, sondern bilden quasi Ionen-konzentrierte Gassäulen im Gase. An diesen Stellen wird dann eine relativ schnelle Wiedervereinigung stattfinden. Diese Vorstellung ist sehr gestützt, vor allem durch Versuche von Moulin, der zeigte, daß der Sättigungsstrom bei einer Plattenorientierung, die senkrecht zu der Bahn der α-Teilchen ist, viel schneller eintritt, als bei einer, die parallel mit ihr geht.

2f) Die Natur der Ionen in Gasen. Entstehung und Größe. Aus der Tabelle der Wanderungsgeschwindigkeiten ist ersichtlich, daß die Wanderungsgeschwindigkeit der verschiedenen Ionen verschieden ist. Es ist nun sehr wesentlich, daß sie sich unabhängig davon ergibt, durch welches Agens die Ionen erzeugt wurden. Die in einem Gase bei gleichem Druck und unter genau gleichen Bedingungen entstandenen Ionen sind die gleichen bei Erzeugung derselben durch Röntgenstrahlen, wie durch die verschiedenen Strahlenarten des Radiums. Auch bei Erzeugung durch die Spitzenentladung, und bei Atmosphärendruck, sowie bei der durch ultraviolettes Licht, ergibt sich die Ionengeschwindigkeit unabhängig von den erzeugenden Strahlen.

Bei den negativen Ionen, die bei der Spitzenentladung und unter Umständen auch bei der Erzeugung durch ultraviolettes Licht im Volumen des Gases frei werden, erhält man bei der Messung meist schwankende und zum Teil größere Werte als bei der Volumenionisation durch Röntgenstrahlen. Dies dürfte daher kommen, daß in jenen Fällen die Ionenerzeugung im Gasvolumen eine indirekte ist, indem erst durch die an den Wänden frei gemachten Elektronen das Gas ionisiert wird, und in die Messung selbst auch freie Elektronen, die nicht aus dem Gase, sondern von den Wänden stammen, eingehen. Eine direkte Erzeugung der Gasionen durch Bestrahlung mit ultraviolettem Licht ist nur bei sehr intensivem Licht von Lenard gefunden worden, und zwar entstanden hierbei sehr langsam wandernde Ionen, die aus einer Ansammlung einer großen Zahl von Molekeln bestanden, und mehr als feste Teilchen, an die sich ein Elektron ansetzte oder von denen es sich absonderte, anzusprechen sind, als wie als Gasionen im gewöhnlichen Sinne.

Geringe Aenderungen im Zustand des Gases, vor allem Spuren von Feuchtigkeit, oder geringe Beimengungen eines zweiten Gases, können für die Messung der Wanderungsgeschwindigkeiten, vor allem bei den negativen Ionen, sehr wesentlich werden. Es beruht dies, wenigstens zum Teil auf der Fähigkeit der Ionen, als Kerne der Kondensation zu wirken, also z. B. Wassermoleküle auf der Oberfläche zu kondensieren. Diese Eigenschaft besitzen nach den hervorragenden, namentlich für die Deutung der Luftelektrizität fundamentalen Untersuchungen von C. T. R. Wilson die negativen Ionen in stärkerem Grade als die positiven.

Der Vorgang der Ionisation eines Gases ist keineswegs völlig geklärt. Einige Aufklärung erbrachte in dieser Hinsicht die Untersuchung der Ionisation bei variablem Druck. Aendert sich der Druck, so müßte, falls das Ion sich nicht selbst ändert, die Wanderungsgeschwindigkeit umgekehrt proportional mit dem Druck wachsen. Dies ist annähernd, aber auch nur annähernd, für das positive Ion erfüllt. Es ist aber keineswegs für das negative Ion erfüllt. Die Wanderungsgeschwindigkeit des negativen Ions wächst viel schneller, als der Proportionalität bei Abnahme des Druckes entspricht. In sehr weitevakuierten Röhren ist das negative Ion stets das Elektron, auch dann, wenn man bei Evakuierung mit einer Oelpumpe oder mit einer Quecksilberpumpe die Oel- respektive Hg-Dämpfe nicht fortschafft. Die Experimente von Langevin machen es bis zu einem gewissen Grade wahrscheinlich, daß bei jeder Ionisation in statu nascendi das negative Ion das Elektron ist. Auch anderweitige Versuche an Flammen und die großen Wanderungsgeschwindigkeiten in chemisch trägen Gasen sprechen dafür, daß das negative Ion in statu nascendi das Elektron ist und in diesem Zustande während eines beträchtlichen Teils seines Weges zwischen den Elektroden bleibt. Die Abweichung der Wanderungsgeschwindigkeit von der Proportionalität mit abnehmendem Druck ist so leicht erklärbar, da bei geringem Druck das Ion länger diesen Status nascendi behält als bei höherem. Die Messung der Wanderungsgeschwindigkeit ergibt alsdann einen Mittelwert, der sich aus der Wanderungsgeschwindigkeit des Elektrons und der des Ions zusammensetzt. In der Tat fand Langevin eine kontinuierliche Zunahme der Wanderungsgeschwindigkeit bis zur Elektronengeschwindigkeit, wenn er den Druck kontinuierlich verringerte.

Der Befund relativ zu starker Zunahme der Wanderungsgeschwindigkeit der positiven Elektrizitätsträger ist zum Teil den Gasmolekülen, die das positive Ion auf seiner Wanderung begleiten, und bei niedrigem Druck sich leicht dissoziieren, zuzuschreiben. Durch die für die Diffusionsgeschwindigkeit erhaltenen Zahlen wird man nämlich mit Notwendigkeit dazu geführt, anzunehmen, daß ein positives Ion bei seiner Wanderung von Gasmolekülen umgeben ist, die seine Geschwindigkeit reduzieren. Vergleicht man

Digitized by Google

die Diffusionsgeschwindigkeiten der Ionen mit denen gewöhnlicher Gasmoleküle, so findet man, daß letztere viel größer sind. Nun aber ist der Diffusionskoeffizient eines Gases annähernd der Quadratwurzel aus den Molekulargewichten der diffundierenden Gase umgekehrt proportional. Aus der Kleinheit des Diffusionskoeffizienten der Ionen muß man deshalb auf eine große Masse des wandernden Ions schließen. Das Kohlensäureion müßte danach etwa 30 mal so groß sein als das Kohlensäuremolekül. Es ist hierbei eine Frage weiterer Vertiefung, ob diese Ionengröße erst eine Folge der Ladung des Ions ist oder nicht. Langevin hat mit Hilfe der Theorie nachgewiesen, daß das Vorhandensein einer Ladung die Stoßzahl vermehren muß, und ein Teil der Verringerung des Diffusionskoeffizienten der Ionen gegenüber dem der Gase ist deshalb nicht der Zunahme der Masse, sondern dem der Stöße zuzuschreiben. Es ist aber sehr unwahrscheinlich, daß auf diese Ursache die ganze Differenz zurückzuführen ist. Die Verringerung der Diffusionskoeffizienten wird sowohl der vergrößerten Stoßzahl, wie der Bildung von Aggregaten, die das Ion mitschleppen muß, zuzuschreiben sein. Es spricht manches dafür, daß die Zusammensetzung dieser Aggregate, die das Ion begleiten, auf der Wanderung sich ändert und in schnellem Wechsel begriffen ist, selbst also nicht eine unveränderliche Masse, sondern eine sich fortgesetzt neu formierende darstellt.

Infolge der Belastung der Ionen auf ihrer Bahn spielt die ursprüngliche Masse des Ions eine ganz untergeordnete Rolle. In der Tat wandern die schweren, positiven Restatome der radioaktiven Substanzen vom Atomgewicht 200 in einem elektrischen Felde im Wasserstoff etwa mit der gleichen Geschwindigkeit, wie die Wasserstoffionen. Auch die Messungen von Wellisch über Wanderungsgeschwindigkeiten in Dämpfen deuten darauf hin, daß die Wanderungsgeschwindigkeit der Ionen im wesentlichen durch das umgebende Gas bestimmt ist, in dem das Ion wandert, und daß die verschiedenen Ionen sich mit ihrer Wanderungsgeschwindigkeit nach dem Ballast richten, den sie aus der Umgebung aufnehmen.

Bei den negativen Ionen sind offenbar ähnliche Verhältnisse vorhanden. Das primär entstehende Elektron ist auf seiner Bahn zum Teil frei von Ansammlungen, zum Teil nicht. Die großen Wanderungsgeschwindigkeiten in Flammengasen, die von H. A. Wilson, Marx und Moreau erhalten wurden, sind hierfür ein prägnantes Beispiel, indem sie Werte bis zu 1700 cm/sec erreichen, also Werte, die zwischen Ionen- und Elektronenbeweglichkeiten liegen.

2g) Die direkte Messung der Ionenladung. Eine direkte Messung der Ionenladung wurde zuerst von J. J. Thomson ausgeführt. Thomson benutzte hierbei die bereits oben erwähnte, sehr wichtige Eigenschaft der Ionen als Kerne der Kondensation in einem Gase zu wirken, das in gewissem Grade mit Wasserdampf übersättigt ist. Um die Ionen kondensiert sich das Wasser so, daß Tropfen entstehen. Namentlich durch die oben erwähnten Versuche von C. T. R. Wilson ist diese Erscheinung, die qualitativ unter dem Namen des Versuchs des „Blauen Dampfstrahls" bekannt war, eingehend studiert worden. Wenn man nachweisen kann, daß die Zahl der Nebeltröptchen mit der Ionenzahl wächst, und zwar direkt proportional, so folgt daraus, daß jedes Ion ein Tröpfchen bildet. Um diesen Nachweis zu führen, wurde von J. J. Thomson das Gewicht des in Tropfenform abgeschiedenen Wassers und der Durchmesser des einzelnen Tropfens bestimmt. Ist diese Bestimmung durchgeführt, so hat man hiermit gleichzeitig die Anzahl der Tropfen, die bei einer bestimmten Ionisation ausfallen. Die Stärke der Ionisation erhält man durch Messung des Stromes; dieser ergibt, wie oben gezeigt wurde, die Größe N.e, wenn die Wanderungsgeschwindigkeiten der Ionen und die Konstanten des Apparates bekannt sind. Die Kenntnis der Tropfenzahl N ermöglicht demnach die Bestimmung von e.

Das Gewicht der niedergeschlagenen Wassermenge wurde auf indirektem Wege ermittelt. Es tritt bei gegebener adiabatischer Expansion eine Abkühlung des Gases ein, welcher aber infolge der Kondensation des bei der Abkühlung übersättigten Wasserdampfes, eine geringe Erwärmung des Gases folgt. Die Abkühlung ist bei gegebener Anfangstemperatur eindeutig berechenbar aus dem bekannten Expansionsgrad. Beobachtet wird die sich einstellende Endtemperatur, die höher liegt als die theoretische Expansionstemperatur, wegen der Erwärmung des Gases durch Kondensation des Wassers. Einer bestimmten Erwärmung entspricht aber eine bestimmte freiwerdende Wassermenge q, die zur Sättigung des Dampfes bei niederer Temperatur notwendig war. So ergibt die Temperaturdifferenz des Endzustandes gegenüber der theoretischen Expansionstemperatur die niedergeschlagene Wassermenge q.

Um nun noch die Größe der Tropfen zu erhalten, wird eine Beobachtung der Fallgeschwindigkeit der Nebeltröpfchen angestellt, indem mit Hilfe eines Fernrohres beobachtet wird, um wie viel sich der Rand der gebildeten Wolke in einer Sekunde senkt. Aus dieser Beobachtung läßt sich dann die Größe der die Wolke bildenden Tröpfchen

Digitized by Google

berechnen. Dies geschieht nach einer Gleichung, die erhalten wird, wenn man berücksichtigt, daß die Reibung der Tröpfchen so groß ist, daß eine Beschleunigung nicht eintritt. Nimmt man Kugelgestalt der Tröpfchen an, so wird $^4/_3\pi r^3 . g = 2\pi r u \varrho$. Hier ist r der Radius der Tröpfchen, u die beobachtete Fallgeschwindigkeit, ϱ der bekannte Reibungskoeffizient der Luft, g die bekannte Massenbeschleunigung. Es läßt sich also r berechnen.

Aus der Niederschlagsmenge q und dem Radius der einzelnen fallenden Kugel erhält man aus der Gleichung $q = n . \frac{4}{3} r^3 \pi$ die Anzahl der fallenden Tropfen, also nach obigem die Anzahl der Ionen, und schließlich, durch Division der erhaltenen Zahl n in die aus der Strommessung gewonnene Größe ne, die Ladung e.

Diese Messung ist später von H. A. Wilson, von Millikan und anderen nach ähnlichen Methoden, die aber die thermodynamische Berechnung der Niederschlagsmenge vermieden, bestimmt worden. Auch haben Meier und Regener die Bestimmung des e aus der Scintillation der α-Teilchen des Poloniums, verbunden mit einer Strommessung durchgeführt, und Planck zeigte, wie man aus den Gesetzen der Strahlung zu ihr gelangt. Der Wert der Konstanten ist $4{,}69 . 10^{-10}$ ESE.

3. Feldentladung. Selbständige Strömung. Wir haben bisher nur Stadium I und II der E-J-Kurve behandelt. Diese Stadien sind dadurch gekennzeichnet, daß die Ionen, die von der angelegten EMK. in Bewegung gesetzt werden, in ihrer Zahl nicht abhängig sind von der Stärke der angelegten EMK. Wir sahen bereits oben, daß dies im Stadium III der E-J-Kurve aufhört. Auch wurde oben bereits ausgeführt, daß man sich die starke Vermehrung der Ionen so erklärt, daß man annimmt, die Ionen seien imstande neue Ionen zu erzeugen, falls sie mit einer bestimmten lebendigen Kraft, also mit einer infolge der angelegten Spannung erreichten, bestimmten Geschwindigkeit auf die Gasmoleküle auftreffen. Die Erscheinungen, die durch diese Ionisierung durch Stoß hervorgerufen werden, sollen in diesem Abschnitt nur ganz generell behandelt werden, weil sie wegen der Bedeutung, die ihnen zukommt, in besonderen Artikeln von anderer Seite beschrieben werden (s. unten).

Man sieht leicht ein, daß die Hypothese der Ionisation durch Stoß es ermöglicht, den enormen Anstieg des Stromes zu erklären, der im Stadium III der E-J-Kurve bei ganz geringer Steigerung der angelegten EMK. erfolgen kann. Sobald ein Ion auf ein Molekül des Gases trifft, entstehen 2 neue Ionen, diese werden sofort wieder vom elektrischen Gefälle ergriffen, erlangen hierdurch selbst Geschwindigkeiten, die hinreichen, um ihrerseits als Erzeuger neuer Ionen durch Stoß in Wirkung zu treten. Eine solche Art der Vermehrung, die der Menge des jeweils Vorhandenen proportional ist, bezeichnet man als eine exponentielle. Aus ihr erklären sich die großen Stromstärken, die im Lichtbogen oder im elektrischen Funken erreicht werden können.

Voraussetzung für die Bildung dieser Ströme ist natürlich, daß, schon bei Anlegung der geringen Spannungen, einige wenige Ionen da sind. Nun ist dies in der Tat der Fall, denn ein jedes Gas zeigt eine, wenn auch geringe Leitfähigkeit, die nicht durch besondere Hilfsmittel erst erzeugt werden muß. Es ist, wie oben ausgeführt, sehr wahrscheinlich, daß diese zum Teil durch die radioaktive Strahlung der Erde erzeugt ist. Man findet, daß sie sich kurze Zeit nach ihrer Beseitigung spontan wieder gebildet hat.

3a) Nichtleuchtende Feldentladung. Der Mechanismus der Feldentladung in Geißlerschen Röhren oder bei der Funken- oder Bogenentladung ist durch die soeben auseinandergesetzte Ionenbildung allein noch nicht erklärbar. Die Erscheinungen führen dazu, daß man den Ionen die Fähigkeit, neue zu bilden, nicht nur beim Auftreffen auf Gasmoleküle zuschreiben muß, sondern auch beim Auftreffen auf feste Körper. Hier zeigt das Experiment, daß beim Auftreffen der Ionen stets Elektronen von Metall emittiert werden und zwar sowohl beim Auftreffen negativer wie positiver Ionen, vorausgesetzt, daß die Geschwindigkeit derselben diesen die erforderliche lebendige Kraft liefert, die für eine Neubildung nötig ist.

Die Angaben, wie groß der Potentialfall sein muß, den die Ionen durchfallen müssen, um die für Bildung neuer Ionen nötige Energie zu erhalten, stimmen nicht völlig überein. Die verschiedenen Experimentatoren erhielten Werte zwischen 2 bis 6 Volt.

Townsend hat die Ionisation durch Stoß eingehend, theoretisch und experimentell, für den Fall behandelt, daß sich das Gas zwischen 2 Platten befindet, die eine Potentialdifferenz hinreichender Stärke haben. Es sei die pro Sek. entstehende Ionenzahl $= n_0$; Rekombinationen sollen nicht eintreten. Ist dann das Feld zwischen den Platten gleichmäßig verteilt, und erzeugt jedes negative Ion auf seinem Wege a zur positiven Platte α neue Ionen pro cm, und die positiven Ionen auf ihrem Wege zur negativen Platte β neue Ionen, so ergibt sich für die Gesamtzahl n der zwischen den Platten entstehenden Ionen der Ausdruck:

Digitized by Google

$$n = \frac{n_0(\alpha-\beta)e^{(\alpha-\beta)a}}{\alpha-\beta.e^{(\alpha-\beta)a}}$$

Wird die Feldstärke bei Abstandsänderung a aufrecht erhalten, so muß dieser Ausdruck die Anzahl der gebildeten Ionen, bei fehlenden Rekombinationen also den Strom, in Abhängigkeit vom Plattenabstand wiedergeben. Um die Formel quantitativ zu prüfen, werden die beiden Konstanten α und β aus 2 Strommessungen bei verschiedenem Plattenabstand a, ermittelt, und es wird für die übrigen beobachteten Plattenabstände der Stromwert mit den so gewonnenen Konstanten nach dieser Formel berechnet und mit den gemessenen Stromwerten verglichen. Folgende Tabelle ist der Arbeit von Townsend entnommen und zeigt, daß hier Rechnung und Beobachtung sehr gut miteinander übereinstimmen. Die Konstanten α und β stehen im Verhältnis von rund 1:500. Das besagt, daß die negativen Ionen in weit höherem Maße die Eigenschaft der Ionisierung durch Stoß haben, als die positiven, da sie auf ihrem Wege 500mal mehr Ionen erzeugen.

Plattenabst.	2	6	10	11 mm
J beob.	2,86	24,2	373	2250
J ber.	2,87	24,6	380	2150

In der Berechnung ist $\alpha = 5{,}25$ und $\beta = 0{,}0141$.

3b) Leuchtende Feldentladung. Wie die Formel ersehen läßt, verschwindet der Nenner der Formel, wenn $\alpha = \beta.e^{(\alpha-\beta)a}$ wird. Dann muß also der Strom im Gase ∞ werden, weil die Ionenzahl n unendlich groß wird. Der Abstand, bei dem dies eintritt, ist gegeben durch

$$A = \lg \alpha/\beta \left(\frac{1}{\alpha-\beta}\right)$$

Townsend zeigte, daß bei dem so berechneten Plattenabstand A, der Strom enorm ansteigt und in eine leuchtende Entladung übergeht. Diese tritt als Glimmentladung (3c), als Funkenentladung (3d) oder als Bogenentladung (3e) auf. Dann hört gleichzeitig die Homogenität des Feldes auf, und hiermit auch die Grundlage obiger Formel.

3c) Glimmentladung (vgl. auch den Artikel „Glimmentladung"). Wenn die Entladung eines hochgespannten Stromes durch ein verdünntes Gas geht, so beobachtet man die bekannten Leuchterscheinungen, die wegen ihrer Farbenpracht seit langem in weitesten Kreisen Beachtung gefunden haben. Der Verlauf, den die Leuchterscheinung längs eines solchen Entladungsrohres nimmt, ist keineswegs kontinuierlich. Man findet, daß die Kathode mit einer dünnen leuchtenden Haut bedeckt ist, der „leuchtenden Kathodenschicht"; hinter dieser Schicht setzt das Leuchten auf einer kurzen Strecke aus. Diese Strecke wird als „dunkler Kathodenraum" bezeichnet. An ihn schließt sich ein zur Kathode konzentrischer Mantel bläulichen Lichtes, das „negative Glimmlicht" an. Nach der Anodenseite hin ist dieses negative Glimmlicht von einem relativ großen dunkeln Raum begrenzt. Dieser große dunkle Raum wird meistens als „Faradayscher Dunkelraum" bezeichnet, während der an der Kathode selbst befindliche „Crookesscher Dunkelraum" genannt wird. Hinter diesem Faradayschen Dunkelraum beginnt eine bis zur Anode reichende, leuchtende Säule, die „Positive Säule" oder „Positives Licht" genannt wird. Dieses positive Licht ist unter Umständen von dunkeln Schichten durchbrochen, so daß es aus einzelnen hellen Scheiben besteht. Dann bezeichnet man es als „geschichtet". Diese Leuchterscheinungen in Vakuumröhren sind sehr weitgehend vom Vakuum und von der Zusammensetzung des Gases abhängig. Die Figur zeigt die Verteilung des Leuchtens in einem typischen Falle geschichteter Glimmentladung.

Die Entladung ist hier mit einer Hochspannungsbatterie von 1000 Volt erhalten, unter Vorschaltung eines Widerstandes. Die Elektrodenspannung betrug 650 Volt, der Gasdruck 1 mm Hg. Das Lumen des Rohres 3 cm und der Elektrodenabstand 18 cm.

Auch diese Erscheinungen lassen sich mit Hilfe der Vorstellung der Stoßionisation erklären, wenn auch wegen ihrer Kompliziertheit in mehr qualitativer Weise. Die von der Kathode beschleunigten, negativen Ionen sind, wie wir im vorigen Abschnitte sahen, die Haupterzeuger neuer Ionen. Wenn sie einen Potentialfall von gewisser Größe durchlaufen haben, beginnt die Ionenerzeugung durch Stoß, und es entsteht an diesen Stellen eine beträchtliche Leitfähigkeit des Gases. Die Folge hiervon muß sein, daß die Feldverteilung zwischen Anode und Kathode aufhört homogen zu sein, so daß an den Stellen in einiger Entfernung von der Kathode, wo diese starke Leitfähigkeit sich ausbildet, das elektrische Gefälle ein viel geringeres sein wird als im Gase um die Kathode herum, wo keine Ionisation durch Stoß stattgefunden hat. Die Folge dieses geringeren Gefälles

Fig. 7.

an den Stellen großer Neubildung von Ionen im Gas wird sein, daß den an diesen Stellen gebildeten Ionen durch das am Entstehungsort herrschende, schwache Feld, nicht die hinreichende Geschwindigkeit erteilt wird, um ihrerseits wieder eine so zahlreiche Nachkommenschaft zu bilden wie ihre Erzeuger. Es wird also in weiterer Entfernung, von der Kathode aus gerechnet, die Leitfähigkeit des Gases wieder abnehmen, dadurch steigt dann wieder das Gefälle, und die wenigen Ionen, die dieses sich so ausbildende Gefälle durchlaufen, können nun wieder hinreichende Energie erwerben, um den Prozeß der Ionenerzeugung durch Stoß und die Bildung einer neuen Schicht großer Leitfähigkeit, die dann wieder geringen Potentialfall aufweist, zu übernehmen. Man sieht, daß man nur annehmen muß, daß die Stellen der maximalen Ionenbildung leuchten, um auf diese Weise sich eine Vorstellung bilden zu können, wie hier die Schichtung in der leuchtenden Entladung in Geißlerschen Röhren zustande kommt. Diese Annahme des Zusammenhangs von Ionenbildung und Leuchten ist auch in der Tat begründet, und es zeigt sich ferner, daß das Gefälle in der Entladungsröhre so verläuft, wie es diesen Ueberlegungen entspricht: Die dunklen Stellen im Rohr weisen viel stärkeren Potentialfall auf als die leuchtenden. Der Potentialfall in dem ersten kurzen Crookesschen Dunkelraum ist viel stärker, als der in dem ausgedehnten Faradayschen. Die Ionen müssen deshalb im Crookesschen Dunkelraum eine geringere Strecke zurücklegen, um neue Ionen zu bilden, als im Faradayschen. An den Stellen maximalen Potentialgefälles ist auch maximale Ionenverarmung vorhanden.

Um die Bildung der Ionen an der Kathode selbst zu erklären, hat J. J. Thomson die Hypothese aufgestellt, daß ihre Erzeugung durch die positiven Ionen erfolgt. Diese werden, infolge des starken Gefälles an der Kathode, zu dieser mit solcher Geschwindigkeit hingezogen werden, daß sie aus ihr neue negative Ionen heraustreiben. Im Gase selbst sind stets einige wenige Ionen auch im normalen Zustande vorhanden; die Hauptmasse bildet sich aber erst dadurch, daß diese wenigen schon vorhandenen durch Beschleunigung in die Lage versetzt werden neue zu bilden. Nach dieser Vorstellung sind die Ionen in der Nähe der Kathode in gegenseitiger Abhängigkeit voneinander. Die negativen erzeugen die Hauptmasse der positiven und diese werden wieder zu Erzeugern der negativen Ionen respektive Elektronen, wenn sie auf die Kathode auftreffen. Erst durch Einführung dieser Hypothese wird es möglich, einen stationären Zustand im Gase zu erklären, denn wenn nicht ein Agens vorhanden wäre, das die Nachlieferung der negativen Ionen von der Kathode übernehmen würde, so müßte die Entladung aufhören, da der Raum zwischen den Elektroden von der Kathode aus immer mehr und mehr von negativen Ionen durch Abwanderung nach der Anode hin entblößt würde.

Daß diese Hypothese in der Tat im wesentlichen zutrifft, geht aus einem Experiment von Wehnelt hervor, das sich mit dieser Thomsonschen Hypothese deuten läßt und sie hierdurch gleichzeitig stützt. Wegen der Wichtigkeit für die Vorstellung des Mechanismus der Gasentladung beschreibe ich es an dieser Stelle: Der positive Ionenstrom, der auf die Kathode zueilt, läßt sich getrennt von den beschriebenen Gasentladungserscheinungen sichtbar machen, wenn man die Kathode mit einem oder mehreren Löchern versieht. Dann geht der positive Strahl durch die Löcher hindurch und läßt sich hier getrennt untersuchen. Diese Strahlen nennt man „Kanalstrahlen". Ihre Entdeckung verdankt man Goldstein. Wenn man nun vor die Löcher der Kathode auf der Seite, die zwischen Anode und Kathode gelegen ist, einen festen Körper im Crookesschen Dunkelraum anbringt, so wirft dieser Fremdkörper einen Schatten, und zwar nach zwei Seiten: Es wird nämlich durch ihn nicht nur der Kanalstrahl jenseits der Anodenseite der Kathode vernichtet, sondern gleichzeitig verschwindet auch der Kathodenstrahl, der von dem beschatteten Teil der Kathode, vor Einschiebung des Hindernisses in den Dunkelraum, ausging. Die Erklärung dieses Experimentes ist offenbar darin zu finden, daß durch das Hindernis der positive Ionenstrom abgeschnitten ist und hierdurch eine Neubildung von Elektronen an der Kathode verhindert wird. Es verschwindet also nicht nur der Kanalstrahl, sondern auch der Kathodenstrahl. Das Leuchten, das an der Oberfläche der Kathode beobachtet wird, die sogenannte „Leuchtende Kathodenschicht" ist wahrscheinlich als der Sitz der Elektronenerzeugung an der Kathodenoberfläche aufzufassen.

Die Beobachtung zeigt, daß es bei sehr viel geringeren Spannungen möglich ist, einen relativ kräftigen Strom durch ein Gas zu treiben, wenn der Druck im Gase ein niedrigerer ist, als bei Atmosphärendruck. Das Elektron hat bei niederem Druck eine viel größere freie Weglänge als bei höherem, d. h. es durchläuft eine größere Strecke, ohne auf ein Molekül des Gases zu stoßen. Nach dem Vorigen ist die Folge hiervon, daß der dunkle Raum ausgedehnter sein wird bei niedrigem Druck als bei hohem, denn die Ausdehnung des Dunkelraumes zeigt ja direkt die Stelle des Zusammenstoßens der Ionen respektive Elektronen mit den

Digitized by Google

Gasmolekülen an. Ist dieser Dunkelraum kurz wie bei hohem Druck, so können die Ionen auf der Strecke nicht die hinreichende lebendige Kraft erreichen, und man muß infolgedessen größere EMK. anwenden, um die Ionisation durch Stoß zu erreichen. Der Crookessche Dunkelraum gibt also ein direktes Maß für die nach obigem zu verstehende, effektive, freie Weglänge der negativen Ionen im Gase. Für alle Gasentladungserscheinungen, die von der Ionisation durch Stoß abhängen, ist deshalb auch die freie Weglänge des Gases eine Fundamentalkonstante. Da diese umgekehrt proportional mit dem Druck wächst, so ergibt sich auch für alle Gasentladungserscheinungen eine weitgehend analoge funktionelle Abhängigkeit zwischen Gasdruck und Stromerzeugung. Bei Aenderung des Druckes muß das Potential geändert werden, um den Stromwert zu erreichen, der der Erzeugung der Ionen durch Stoß entspricht. Für das Potential, das nötig ist, um das Stadium III der Gasentladungskurve zu erreichen, gilt bei Gasentladungserscheinungen allgemein ein Gesetz von dem Charakter

$$V = f(d/\lambda).$$

Hier bedeutet λ die freie Weglänge, die in obigem Sinne zu verstehen ist, der sich nicht genau mit dem der Gastheorie deckt, d eine Apparatkonstante, z. B. bei der Funkenentladung die Entfernung der Elektroden. Für dieses Gebiet der Ionisation durch Stoß ist das Gesetz auch zuerst in seiner vollen Allgemeinheit erkannt und von Paaschen bewiesen worden. Man nennt es deshalb auch Paaschensches Gesetz.

3d) Funkenentladung (vgl. den Artikel „Funkenentladung"). Die Erscheinungen der Funkenentladung sind denen der Glimmentladung durchaus analog. Man kann direkt zeigen, daß die Funkenentladung bei geringer Stromstärke nichts anderes ist, als eine Glimmentladung, die diskontinuierlich erfolgt. Wenn man eine Leidener Flasche mittlerer Größe durch eine Funkenstrecke entlädt, so kann man an der Leuchterscheinung eine positive Säule, einen Faradayschen Dunkelraum und negatives Licht in analoger Anordnung wie bei der Glimmentladung in Vakuumröhren unterscheiden. Auch sonst haben alle wesentlichen Beobachtungen in einem der Gebiete ihr Analogon im anderen. So gibt es ein berühmtes Experiment von Hittorf, welches zeigt, daß in dem Falle, daß die Gasentladung zwischen zwei Elektroden übergehen soll, die einander bis auf eine sehr geringe Entfernung genähert sind, die Entladung diesen Weg nur nimmt, wenn ihr kein längerer Weg zur Verfügung steht. In der Figur 8 ist die Entfernung der beiden Elektroden nur 1 mm, die Gasröhre, die den zweiten Weg darstellt, der der Entladung zur Verfügung steht, ist $3^3/_4$ m lang. Trotzdem geht die Entladung den langen Weg. Das Analogon hierzu in der Funkenentladung ist durch die Anordnung von Carr in der Fig. 9 gegeben. Zwei Messingplatten werden durch Ebonit auseinandergehalten. Verändert man die Plattenentfernung, so zeigt sich ein starkes Anwachsen des Funkenpotentials mit abnehmendem Abstand. Wenn eine gewisse untere Grenze des Plattenabstandes erreicht ist, geht der Strom leichter bei großer Entfernung zwischen den Platten über, als bei sehr geringer, er bevorzugt also den weiteren Weg. Der Funke geht dann auch in der Tat, wenn er einsetzt, nicht auf dem kürzesten Wege, sondern diagonal durch den Zwischenraum der Platten der Figur 9. Die Platten sind in Ebonit eingebettet und Luftschächte zum Entweichen der Luft gelassen.

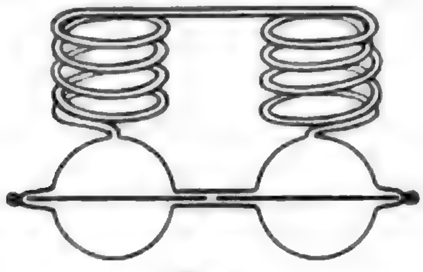


Fig. 8.

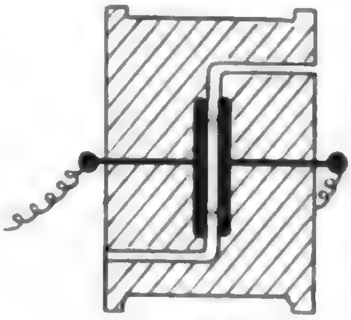


Fig. 9.

3e) Bogenentladung (vgl. den Artikel „Bogenentladung"). Bei der Funkenentladung ist ein hohes Potential an den Elektroden erforderlich und der Strom, der in der Sekunde erhalten wird, ist ein sehr geringer und nur während geringer Bruchteile einer Sekunde beträchtlich. Wird nun eine Elektrode so heiß, daß sie zu verdampfen beginnt, so setzt Bogenentladung ein. Dann wird die Stromstärke sehr beträchtlich und die Spannung an den Elektroden nimmt dauernd geringe Werte an. Die Bedingungen, die erforderlich sind, um eine Bogenentladung aufrecht zu erhalten, sind die, daß dem einen Pol immer hinreichende Energie zugeführt werden muß, um ihn glühend zu erhalten. Diese Arbeit muß

Digitized by Google

hier ebenfalls durch die Ionen geleistet werden. Sie müssen weniger mit großer Geschwindigkeit als in großer Zahl auf die Elektrode treffen. Die Nachlieferung der Ionen, die für den stationären Zustand erforderlich ist, erfolgt dann nicht nur durch die Neubildung durch Stoß, sondern zum Teil durch das Glühen selbst. Denn es ist nachgewiesen worden, daß jeder glühende Körper sehr beträchtliche Elektronenmengen emittiert und daß diese Emission in hohem Grade mit steigender Temperatur wächst. Auch diese Bedingungen kann man in gewissem Grade formulieren und so die experimentellen Ergebnisse mit den theoretischen Vorstellungen qualitativ-quantitativ vergleichen.

4. Charakteristik und Stabilität. Zum Schlusse dieses einleitenden Kapitels möge noch auf eine andere Art der rechnerischen Betrachtungsweise hingewiesen werden, die in gewissem Grade unabhängig von der atomistischen Ionenhypothese ist, die hier ausschließlich Verwendung fand. Wenn man in der Art, wie das in der Elektrotechnik üblich ist, die an dem Entladungsgefäß liegende Klemmenspannung als Funktion der Stromstärke aufträgt, so erhält man als Kurvengleichung

$$1)\quad E = f(J).$$

Diese Beziehung bezeichnet man als die Charakteristik der Gasstrecke. Nun wird die Gasentladung durch eine Stromquelle hervorgerufen, die eine bestimmte EMK. E_0 besitzt und unter Einschaltung eines Vorschaltwiderstandes W an die Klemmen der Entladungsröhre angelegt wird. Es wird deshalb

$$2)\quad E_0 - J.W = E = f(J).$$

Wenn man demnach die Charakteristik einer Gasstrecke für eine vorgegebene Spannung E_0 aufgenommen hat, indem man den Vorschaltwiderstand und hiermit den Strom veränderte und bei jeder Veränderung den zu einem bestimmten J-Wert zugehörigen Klemmenspannungswert E als Kurvenpunkt festlegte, so kann man aus dieser speziellen Charakteristik auch für jede andere Betriebsspannung E_0' die Größe des Vorschaltwiderstandes angeben, die zur Erreichung eines bestimmten Stromwertes erforderlich ist.

In der Figur 10 stelle die Kurve eine experimentell erhaltene Charakteristik dar. Auf der Ordinate werde die Betriebsspannung E_0 abgetragen. Verbindet man den so festgelegten Ordinatenpunkt mit dem Punkte der Charakteristik, der dem vorgeschriebenen Werte des zu erreichenden Stromwertes entspricht, so ist ersichtlich, daß diese Verbindungsgerade mit der Abszissenachse einen Winkel einschließt, der bestimmt ist, durch die Beziehung

$$3)\quad tg.\alpha = \frac{E_0 - E}{J}.$$

Nach Gleichung 2 ist aber die rechte Seite dieser Gleichung gleich W, dem Vorschaltwiderstand. Aus der Charakteristik kann man dann ersehen, daß, wenn man bei einer gegebenen EMK. mit großem Vorschaltwiderstand beginnend, denselben immer kleiner und kleiner macht, man aus dem Gebiet der Glimmentladung zu einem Punkte kommt, an dem eine minimale Aenderung des Vorschaltwiderstandes sofort eine sehr beträchtliche Aenderung des Stromes mit sich bringt,

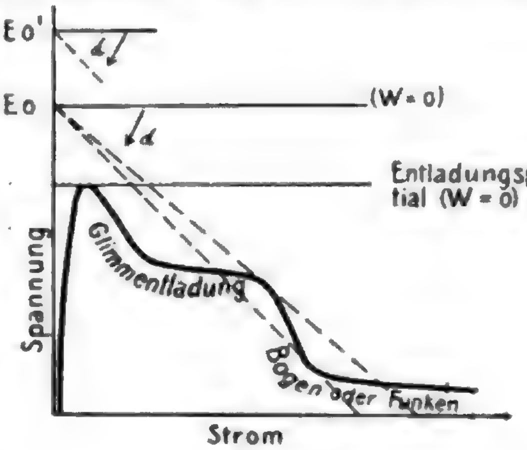


Fig. 10.

indem unter Uebergang von Funken- in Bogenentladung der Strom sofort einen sehr starken Anstieg erleidet. Einen solchen Zustand, bei dem eine minimale Veränderung zu einem ganz andersartigen Zustand führen kann, der alsdann nur durch große Veränderung wieder rückgängig gemacht werden kann, bezeichnet man als labil. Man kann hieraus für jede gegebene Charakteristik entnehmen, bei welcher EMK. und bei welchem zugehörigen Vorschaltwiderstand die Entladung stabil bleibt, und wann sie labil zu werden beginnt. Es ist dies von der Neigung der Verbindungsgraden abghängig, bei der diese zur Tangente der Charakteristik wird. Man kann die Labilität dieses Ueberganges leicht dadurch sichtbar machen, daß man zeigt, daß nach Eintritt der Bogenentladung, ein Zurückgehen auf den Wert des Vorschaltwiderstandes, der vor Einsetzen des Bogens noch Glimmentladung ergab, jetzt die Bogenentladung bestehen läßt. Es ist also ein neuer stabiler Zustand eingetreten. Diese Betrachtungen, die zuerst von W. Kaufmann in die Behandlung der Gasentladungserscheinungen eingeführt wurden, sind in einzelnen Zweigen des Gebietes sehr fruchtbar gewesen und haben namentlich für die komplizierten

Digitized by Google

Erscheinungen, die im Wechselstrom-Lichtbogen auftreten, sehr wertvolle Aufklärung erbracht, die hier vor allem H. Th. Simon zu verdanken ist.

Literatur. *J. J. Thomson, Conduction of Electricity through gases. Cambrige. Deutsch: Elektrizitätsdurchgang in Gasen. Leipzig 1907. — J. Stark, Bearbeitung des Gebietes in Winkelmanns Handbuch. 2. Aufl. — J. S. Townsend, Bearbeitung des Gebietes in Marx' Handbuch der Radiophysik [unter der Presse]. — Die zitierten englischen Originalarbeiten sind im Philosophical Magazine erschienen. Die deutschen in der Physikalischen Zeitschrift oder in den Annalen der Physik.*

E. Marx.

Elektrizitätsproduktion.

1. Einführung: a) Die Elektrizitätsproduktion als allgemeine Eigenschaft der lebendigen Substanz. b) Geschichte der Elektrizitätsproduktion. c) Methoden zur Untersuchung der Elektrizitätsproduktion. d) Demarkationsstrom und Aktionsstrom. e) Beziehung zwischen Elektrizitätsproduktion und Lebensvorgang. 2. Tierische Elektrizität: a) Elektrizitätsproduktion der Muskeln: α) Quergestreifte Muskeln. β) Glatte Muskeln. γ) Herzmuskel. b) Elektrische Organe. c) Nervensystem: α) Zentralnervensystem. β) Nerven. d) Ströme an den Augen. e) Drüsenströme. 3. Elektrizitätsproduktion bei Pflanzen: a) Stengel, Blätter, Blüten, Drüsen, Keimlinge. b) Elektrizitätsproduktion bei Reizbewegungen. 4. Theorie der Elektrizitätsproduktion: a) Reibungselektrizität. b) Galvanische Elektrizität: α) Demarkationsstrom und die Aktionsströme. β) Theorie der Produktion galvanischer Elektrizität.

1. Einführung. 1a) Elektrizitätsproduktion als allgemeine Eigenschaft der lebenden Substanz. Jeder Lebensvorgang ist mit einer Elektrizitätsproduktion verbunden; mögen wir den sich kontrahierenden Muskel, den die Erregung leitenden Nerven, die sezernierende Drüsenzelle untersuchen oder mögen wir die strommessenden Instrumente an Pflanzenzellen anlegen, immer sehen wir den Lebensvorgang von einer Elektrizitätsproduktion begleitet.

1b) Geschichte der Elektrizitätsproduktion. Die Kenntnis von der weiten Verbreitung elektrischer Vorgänge in der belebten Natur verdanken wir der großen Zahl von Untersuchungen, die etwa um die Mitte des vorigen Jahrhunderts ihren Anfang genommen haben und die insbesondere mit dem Namen Emil Du Bois Reymonds und seiner Schüler verknüpft sind. Du Bois Reymond hat die wichtigsten Methoden für die Untersuchung tierischer Elektrizität geschaffen, er hat mit ihnen eine Reihe grundlegender Untersuchungen ausgeführt und seine Erfahrungen in dem bekannten Werke „Untersuchungen über tierische Elektrizität" niedergelegt.

Schon seit langer Zeit waren die merkwürdigen Wirkungen jener Fische bekannt, welche wir heute elektrische Fische nennen, aber erst im 18. Jahrhundert wurde man auf die Aehnlichkeit dieser Fischschläge mit elektrischen Entladungen aufmerksam. Diese manifesten Erscheinungen tierischer Elektrizität waren es jedoch nicht, von welchen die Untersuchungen über Elektrizitätsproduktion ihren Ausgang nahmen, es war vielmehr Galvanis Beobachtung der Zuckungen enthäuteter Froschschenkel, die er mit kupfernen Haken an das eiserne Geländer seines Balkons gehängt hatte. Galvani meinte, daß diese Zuckungen durch Elektrizität hervorgerufen würden, welche in den Froschschenkeln entstünde. Volta, welcher diese Versuche Galvanis aufnahm und bestätigte, führte dagegen die Zuckungen auf Ströme zurück, welche durch die Berührung der beiden verschiedenen Metalle mit dem feuchten Muskel zustandekommen. Es entwickelte sich ein lebhafter Streit zwischen Galvani und Volta und ihren Anhängern und aus diesem Streit ging eine Reihe für die Naturwissenschaft höchst bedeutsamer Erkenntnisse hervor. Bei seinen weiteren Versuchen fand Galvani Zuckungen der Froschschenkel ohne die Beteiligung von Metallen; er legte durch diese Beobachtung die Grundlage zu unseren Kenntnissen von der tierischen Elektrizität und den galvanischen Strömen. Um den weiteren Ausbau dieser Erfahrungen haben sich Ritter, Nobili, Matteucci, Alexander v. Humboldt, Du Bois Reymond, Hermann, Hering, Biedermann große Verdienste erworben. Du Bois-Reymond und L. Hermann stehen jedoch mit ihren Leistungen an der Spitze. Ersterer hat, wie schon oben erwähnt, die experimentellen Grundlagen geschaffen und durch seine weitangelegten Untersuchungen die Aufmerksamkeit der Naturforscher seiner Zeit auf dieses interessante Gebiet hingelenkt. Letzterer hat durch seine zielbewußten Versuche die erste Grundlage für das Verständnis der elektrischen Erscheinungen im Tier- und Pflanzenreich geschaffen.

1c) Methoden zur Untersuchung der Elektrizitätsproduktion. Die Methoden zur Untersuchung der Elektrizitätsproduktion haben sich erst allmählich zu der Empfindlichkeit entwickelt, die sie heute besitzen. Aber auch heute noch wird vielfach zur Demonstration der Grundtatsachen das physiologische Rheoskop verwendet, das ist ein frisches Nervmuskelpräparat des Frosches. Du Bois-Reymond baute sich für seine

Digitized by Google

Untersuchungen den windungsreichen Multiplikator. Der Multiplikator besteht im Prinzip aus einem aufgehängten Magneten, um den in zahlreichen Windungen ein dünner, isolierter Kupferdraht geführt ist. Geht ein Strom durch den Draht, so wird die Magnetnadel nach der Ampèreschen Regel abgelenkt. Auf dem Prinzip des Multiplikators beruhen die verschiedenen Spiegelgalvanometer, bei welchen ein Spiegelchen mit der Magnetnadel verbunden ist und es ermöglicht, die Ausschläge auch photographisch zu registrieren. Die Spiegelgalvanometer können eine große Empfindlichkeit besitzen. Sie gestatten auch genaue Messungen der elektromotorischen Kräfte vorzunehmen, aber sie haben den Nachteil, periodisch zu schwingen und nach einem Ausschlag nur langsam ihre Ruhelage zu erreichen. Auf einem anderen Konstruktionsprinzip beruhen das Kapillarelektrometer und das Saitengalvanometer. Das Kapillarelektrometer nach Lippmann besteht aus einer mit Quecksilber gefüllten Glaskapillare, die in einem mit verdünnter Schwefelsäure gefüllten Trog eintaucht. Wird durch dieses System ein Strom geschickt, so findet innerhalb der Kapillare, an der Grenzfläche zwischen Quecksilber und Schwefelsäure eine Polarisation statt, die mit einer Veränderung der Oberflächenspannung verbunden ist. Der Quecksilberfaden rückt in der Kapillare vor oder zieht sich zurück, je nach der Richtung des durchgehenden Stromes. Die Bewegungen

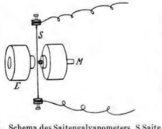


Fig. 1. Schema des Saitengalvanometers, S Saite, E Elektromagnet, M Mikroskop.

des Quecksilbermeniskus werden mit einem Mikroskop beobachtet oder können photographisch aufgenommen werden. Das Kapillarelektrometer gibt, obwohl es ziemlich rasch reagieren kann, bei schnell verlaufenden Stromstößen nicht genau den zeitlichen Verlauf derselben wieder; doch lassen sich die Kurven leicht auf ihre wahren Werte reduzieren. Eine große Empfindlichkeit und Flinkheit der Reaktion besitzt das von Einthoven erfundene Saitengalvanometer. Ein feiner Platinfaden oder ein versilberter Quarzfaden, die Saite S, ist, wie die schematische Figur 1 zeigt, zwischen den Polen eines starken Elektromagneten E ausgespannt. Geht ein Strom durch die Saite, so wird sie senkrecht zu den magnetischen Kraftlinien abgelenkt. Die Ausschläge könnten mikroskopisch beobachtet oder photographisch aufgezeichnet werden. Figur 2 zeigt die photo-

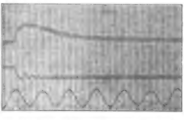


Fig. 2. Verlauf des Aktionsstromes vom Nerven.

graphisch aufgenommene Saitenbewegung, die durch eine elektrische Schwankung im Froschnerven hervorgerufen wurde. Die Saitenbewegungen geben bei nicht zu schnellen Stromschwankungen den Verlauf derselben getreu wieder. Die Handhabung des Apparates ist eine so einfache und seine Vorzüge sind so einleuchtend, daß er sich in kurzer Zeit nicht nur seinen Platz in der physiologischen Methodik erobert, sondern auch das Studium der elektrischen Vorgänge neu belebt hat.

Ein wichtiges Hilfsmittel für die Untersuchung der Elektrizitätsproduktion sind die unpolarisierbaren Elektroden. Eine einfache Modifikation derselben ist in Figur 3

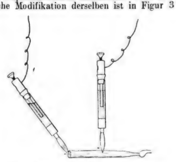


Fig. 3. Unpolarisierbare Pinselelektroden.

wiedergegeben. Die Pinselelektrode, die wir in der Abbildung sehen, besteht aus einem Glasröhrchen, das an einem Ende durch einen mit physiologischer Kochsalzlösung gekneteten Tonpfropfen abgeschlossen und mit

Digitized by Google

gesättigter Zinksulfatlösung gefüllt ist. In die Zinksulfatlösung taucht ein amalgamierter Zinkstab hinein, durch den die Ableitung des Stromes erfolgt. In den Tonpfropf ist ein mit physiologischer Kochsalzlösung (0,6 bis 0,9%) getränkter Pinsel gesteckt, der die Verbindung mit der lebendigen Substanz herstellt. Würden Metallelektroden verwendet werden, so könnte es zwischen den Elektroden und dem feuchten Leiter des Nerven zu einer Polarisation kommen, welche schwache Ströme der lebendigen Substanz verdecken würde. Eine umfassende Zusammenstellung der elektrophysiologischen Methodik ist von Garten im Tigerstedtschen Handbuch der physiologischen Methodik gegeben worden.

1d) Demarkationsstrom und Aktionsstrom. Legen wir ein paar unpolarisierbare Elektroden an einen Muskel, so läßt sich ein schwacher Strom, der Ruhestrom, ableiten. Diese Beobachtung hat zu dem Schluß verleitet, daß in jeder lebendigen Substanz schon von vornherein ein Strom vorhanden sei (Präexistenztheorie). Hermann hat jedoch durch seine Untersuchungen den Nachweis erbracht, daß möglichst schonend präparierte Muskeln keinen Strom aufweisen, daß aber ein Strom sofort auftritt, wenn der Muskel an einer Stelle verletzt wird. Wird ein Muskel quer durchschnitten und dieser Querschnitt mit einer unverletzten Stelle seines Längsschnittes verbunden, wie die Figur 3 zeigt, so verhält sich die geschädigte Stelle negativ zur ungeschädigten, d. h. der Strom fließt außerhalb des Muskels vom Längsschnitt zum Querschnitt. Hermann hat ferner gezeigt, daß jede wie immer geartete Schädigung einer Muskelstelle (Abkühlung, Narkose, Aetzung, Ver-

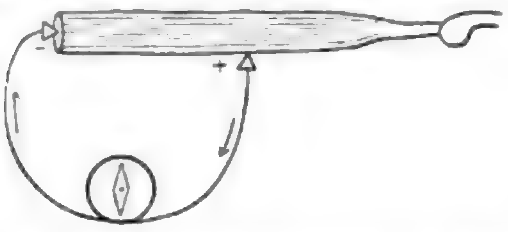


Fig. 4. Verlauf des Ruhestromes des Muskels.

brennung) dieselbe negativ gegenüber den ungeschädigten Muskelstellen macht. Hermann hat in Erkenntnis dieser Verhältnisse diesen Strom als Demarkationsstrom bezeichnet. Der Demarkationsstrom zeigt uns an, daß die geschädigte Stelle chemisch verschieden ist von den ungeschädigten Stellen des Muskels. Eine chemische Verschiedenheit tritt auch auf, wenn ein Teil des Muskels in Erregung versetzt worden ist. Jede erregte Stelle verhält sich negativ gegenüber den unerregten Stellen. Figur 4 zeigt das elektrische Verhalten des ruhenden Muskels. Reizen wir nun den Muskel an einem Ende mit Hilfe der Reizelektroden R, so beginnt der Muskel sich an der Reizstelle zu kontrahieren und eine Kontraktionswelle läuft über den ganzen Muskel ab (vgl. den Artikel „Muskeln, allgemeine Physiologie der

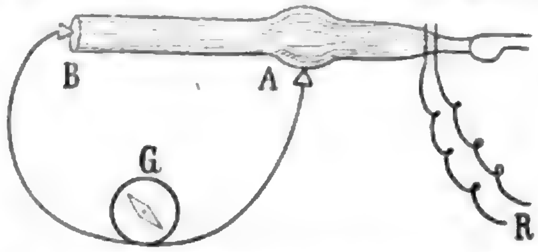


Fig 5. Verlauf des Aktionsstromes im Muskel. G Galvanometer. R Reizelektroden.

Muskeln“). Läuft die Kontraktionswelle über Ableitungsstelle A, so wird diese Stelle negativ und das strommessende Instrument zeigt einen kurzdauernden Rückgang des Demarkationsstromes, eine negative Schwankung auf. Diese negative Schwankung wird, da sie die Aktion des Muskels begleitet, auch als Aktionsstrom bezeichnet. Wir können den Aktionsstrom auch von zwei unverletzten Stellen des Muskels ableiten, wie dies Figur 6 zeigt. Dann bekommen

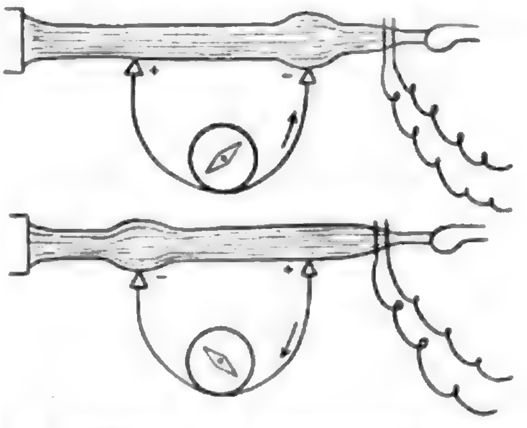


Fig. 6. Ableitung des zweiphasischen Aktionsstromes.

wir, wenn die beiden Ableitungsstellen genügend weit voneinander entfernt sind, einen komplizierteren Verlauf des Aktionsstromes. Kommt die Kontraktionswelle zur Ableitungsstelle A, so wird diese negativ im Verhältnis zur Ableitungsstelle B. Schreitet dann die Kontraktionswelle zur Ableitungsstelle B vor, dann wird diese negativ gegenüber A und es erfolgt eine Schwankung in entgegengesetztem Sinne. Wir erhalten einen zweiphasischen Aktionsstrom. Die Figur 7 zeigt uns den Verlauf eines einphasischen (oben) und eines zweiphasischen Aktionsstromes.

1e) Beziehungen zwischen Elektrizitätsproduktion und Lebensvorgang. Die Erkenntnis der weiten Verbreitung

Digitized by Google

der elektrischen Vorgänge in der belebten Natur hat anfänglich zu falschen Hoffnungen verleitet. Man dachte sich das Leben selbst als elektrischen Vorgang. So glaubte man das Problem der Nervenleitung gelöst zu haben. Der Nerv sollte wie ein metallischer Leiter der Ausbreitung der elektrischen Erregung dienen usf. Heute wissen wir, daß die

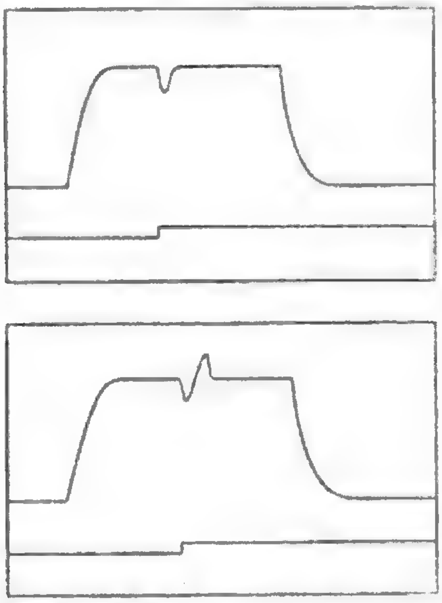


Fig. 7. Einphasischer (oben) und zweiphasischer Aktionsstrom. Die Hebung der unteren Linie zeigt den Moment der Reizung an.

Elektrizitätsproduktion bloß ein Ausdruck des Lebensvorganges ist, nicht der Lebensvorgang selbst. Das Studium der Elektrizitätsproduktion hat es nichtsdestoweniger ermöglicht, tiefer in den Mechanismus vieler Lebensvorgänge einzudringen. Die im Energie- und Stoffwechsel verbrauchten Energien werden nur zum Teil in thermische Energie verwandelt, ein Teil kommt in elektrischer, ein anderer kann, wie bei den Muskeln in mechanischer, oder bei den Pflanzen in osmotischer Energie zum Ausdruck kommen. Die Mengen einer bestimmten Energie, welche bei einem Lebensvorgang frei werden, hängen von der Art der lebendigen Substanz ab. Die geringen Energiemengen, welche im Stoffwechsel der Nerven verbraucht werden, äußern sich in Form elektrischer Energie, die Produktion thermischer Energie hat sich nicht nachweisen lassen. Beim Muskel wird ein großer Teil der ihm zugeführten Energie in mechanische Energie verwandelt, bei den elektrischen Organen wird der Hauptteil der Energie in Form elektrischer Energie frei. Wenn also die Menge elektrischer Energie auch nicht ein genauer Ausdruck der Intensität der Lebensvorgänge ist, so gestattet sie doch bei der einzelnen Form lebendiger Substanz einen Einblick in die Intensität der Vorgänge bei verschiedenen Zuständen. Bei höherer Temperatur nimmt die elektromotorische Kraft der Aktionsströme zu, bei Temperaturerniedrigung oder Ermüdung nimmt sie ab und läßt, da auch die anderen Energieäußerungen Aenderungen im gleichen Sinne durchmachen, erkennen, daß die Elektrizitätsprod. ktion enge mit dem Lebensvorgang verbunden ist.

Die Aktionsströme gewähren einen Einblick in die Geschwindigkeit der einzelnen Phasen des Lebensvorganges. Wir unterscheiden zwei Phasen des Aktionsstromes. Der aufsteigende Schenkel entspricht den durch den Reiz gesteigerten energieliefernden Prozessen, der absteigende Schenkel entspricht der Restitution der vor der Reizung bestehenden Verhältnisse, er umfaßt den Wiederersatz des verbrauchten Materials und die Wegschaffung der nicht mehr verwertbaren und giftigen Stoffwechselprodukte. Das Studium des zeitlichen Verlaufes des Aktionsstromes und seiner Veränderungen gibt Aufschluß über die Veränderungen dieser beiden Phasen des Stoffwechsels. Der aufsteigende Schenkel gibt uns Aufschluß über die Reaktionsgeschwindigkeit der lebendigen Substanz. Nerven mit einer großen Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Erregung zeigen eine außerordentlich kurze Dauer des aufsteigenden Teiles des Aktionsstromes. Bei Verlangsamung der Fortpflanzungsgeschwindigkeit durch Narkose oder Abkühlung nimmt auch die Dauer des aufsteigenden Schenkels zu. Die Betrachtung des absteigenden Schenkels zeigt uns, daß er in der Regel langsamer verläuft als der aufsteigende und daß er bei lähmender Beeinflussung, z. B. durch Narkose oder Abkühlung, eine weit stärkere Verlängerung erfährt als der aufsteigende Schenkel. Die Restitution wird stärker gelähmt als die energieliefernden Vorgänge. Die Folge davon ist, daß z. B. beim Nerven durch Narkose oder Abkühlung die Ermüdbarkeit gesteigert ist. Figur 8 gibt schema-

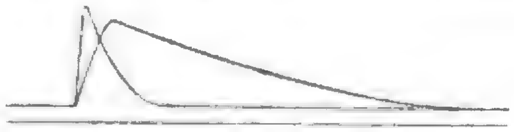


Fig. 8. Aktionsstrom der Nerven vor und während der Narkose.

tisch die Veränderung des Aktionsstromes des Nerven durch Narkose wieder, ebenso verhalten sich die Aktionsströme verschieden schnellleitender Nerven.

Das Studium der Aktionsströme ist auch deswegen von Bedeutung, weil sie den genauesten Aufschluß über die zeitlichen Verhältnisse der Lebensvorgänge ermöglichen. Mit dem Beginn der Lebensvorgänge lassen sich auch die elektrischen Vorgänge nachweisen. Wir können an einem Muskel die Ent-

Digitized by Google

wicklung der elektrischen, mechanischen und thermischen Begleiterscheinungen des Lebensvorganges nach Reizung beobachten. Nach kurzer Latenzzeit tritt der Aktionsstrom auf, dann folgt die Verkürzung und erst nach unverhältnismäßig längerer Zeit wird auch die thermische Energie wahrnehmbar, und doch muß die thermische Energie Ausdruck des gleichen Lebensvorganges sein, wie die Produktion elektrischer Energie. Es braucht nur längere Zeit bis die beim Erregungsvorgang produzierte Wärme zu den temperaturmessenden Instrumenten geleitet wird. Dasselbe Verhältnis besteht auch zwischen elektrischer und mechanischer Energie. Es braucht länger bis die Trägheit der Muskelelemente überwunden ist. Die Figur 9 gibt uns über das zeitliche Verhältnis zwischen der Produktion mechanischer und elektrischer Energie des Muskels Aufschluß. Die oberste Kurve gibt die Zeit an, sie ist mit einer Zungenpfeife von 276 Doppelschwingungen in der Sekunde geschrieben. Die zweite Kurve ist der einphasische Aktionsstrom des Muskels. Die unterste Kurve gibt den Verlauf der Zuckung wieder.

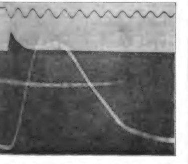


Fig. 9. Zeitliches Verhältnis zwischen Aktionsstrom und Kontraktion des Muskels. Nach v. Brücke.

Aber noch in anderer Beziehung erscheint das Studium der Elektrizitätsproduktion von Bedeutung. Es ermöglicht bei vielen Formen lebendiger Substanz die direkte Untersuchung der Lebensvorgänge, während bisher vielfach nur indirekte Untersuchungsmöglichkeiten vorhanden waren.

Die Vorgänge im Nerven mußten früher aus den Veränderungen in der Reaktion ihrer Erfolgsorgane erschlossen werden, während wir mit Hilfe der Aktionsströme die Vorgänge im Nerven direkt untersuchen können. Wir sind ferner imstande die Aktionsströme vom intakten menschlichen Körper abzuleiten und so die Lebensvorgänge des Herzens und der Muskeln am unverletzten Organismus zu studieren. Die Reihe dieser Beispiele ließe sich noch wesentlich verlängern.

2. Tierische Elektrizität. **2a)** Elektrizitätsproduktion der Muskeln. *α*) Quergestreifte Muskeln (vgl. den Artikel „Muskeln"). Wie wir oben gehört haben, lassen quergestreifte Muskeln keinen oder nur einen geringen Strom erkennen, wenn man von zwei unverletzten Stellen des Muskels zu einem Galvanometer ableitet. Wird dagegen eine verletzte und eine unverletzte Stelle des Muskels mit dem strommessenden Instrument verbunden, so zeigt dasselbe einen starken Strom an, der außerhalb des Muskels vom Längsschnitt zum Querschnitt läuft. Die elektromotorische Kraft dieses Demarkations- oder Ruhestromes hängt von der Art und dem Zustand des Muskels ab, sie kann Werte von 0,04 Volt erreichen. Der Demarkationsstrom entwickelt sich rasch nach der Verletzung des Muskels, erreicht bald sein Maximum, um dann wieder abzunehmen. Legt man einen neuen Querschnitt an, so kehrt der Demarkationsstrom mit erneuter Kraft wieder. Es geht daraus hervor, daß das Absinken des Demarkationsstromes mit Veränderungen am Querschnitt des Muskels zusammenhängt. Der Absterbeprozeß, der an der verletzten Stelle rasch einsetzt und die zu dem Strom Anlaß gebende Differenz im chemischen Geschehen bewirkt, schreitet längs der Fasern fort, dadurch leiten wir den Strom von noch nicht vollkommen totem Gewebe ab, die Differenz zwischen den beiden Ableitungsstellen wird dadurch nur gering.

Der Demarkationsstrom des Muskels kann so stark sein, daß der Muskel durch Schließung seines eigenen Demarkationsstromes erregt werden kann. Es gelingt auch durch den Demarkationsstrom eines Muskels einen anderen zu erregen (sekundäre Zuckung).

Etwas anders liegen die Verhältnisse bei einem Muskel, bei welchem der Schnitt schräge zur Längsachse der Fasern angelegt wird. An einem schrägdurchschnittenen Muskel kann man Ströme nachweisen, welche außerhalb des Muskels von der stumpfen zur scharfen Kante hinfließen. Dieser Strom wird als Neigungsstrom bezeichnet. Die Kenntnis des Neigungsstromes ist deshalb wichtig, weil bei gefiederten Muskeln der Querschnitt häufig schräg ist. So entspricht, wie schon Du Bois-Reymond hervorgehoben hat, der natürliche Querschnitt des Wadenmuskels bei Ableitung vom Längsschnitt zur Achillessehne einem schrägen Querschnitt und das dadurch bedingte Auftreten dieser Ströme kompliziert das Bild des Stromverlaufes bei Ableitung an verschiedenen Stellen des Muskels.

Wenn wir von zwei Längsschnittstellen

Digitized by Google

des Muskels ableiten, so verhält sich immer jene Ableitungsstelle negativ, welche näher zum natürlichen, bezw. künstlichen Querschnitt liegt.

Da die Stärke des Demarkationsstromes vom Verhältnis des Längs- und Querschnittes abhängt, von dem abgeleitet wird, ist es verständlich, daß bei Schädigung der Ableitungsstelle am Längsschnitt eine Verminderung des Demarkationsstromes eintritt. Wie die Untersuchungen von Biedermann gezeigt haben, nimmt bei der Narkose des Längsschnittes der Demarkationsstrom zwar ab, er verschwindet jedoch nicht vollständig, obwohl die Erregbarkeit des Muskels vollkommen geschwunden sein kann. Diese Beobachtung spricht dafür, daß durch diese Narkose nicht alle Lebensvorgänge zum Stillstand gebracht wurden. Dafür würde auch die Wiedererholbarkeit des narkotisierten Muskels sprechen.

Es wurde schon oben darauf hingewiesen, daß auch die erregte Stelle eines Muskels sich gegenüber den ruhenden Stellen negativ verhält. Da die Erregungswelle schnell über den quergestreiften Muskel abläuft, so erhalten wir einen kurz dauernden Strom in dem Moment, in dem die Erregungswelle die Ableitungsstelle am Längsschnitt passiert. Ist ein Demarkationsstrom vorhanden, so wird er durch den Strom, der bei der Erregung entsteht, geschwächt; wir sprechen daher von einer negativen Schwankung des Demarkationsstromes oder kurz von einem Aktionsstrom (siehe Fig. 7). Es liegen Angaben vor, daß unter Umständen der Aktionsstrom eine größere elektromotorische Kraft erreicht als der Demarkationsstrom. Dies kann aber nur dann der Fall sein, wenn der Querschnitt nicht ganz abgetötet ist. Ist er aber abgetötet, dann kann die elektromotorische Kraft des Aktionsstromes niemals größer sein als die des Demarkationsstroms.

Die elektromotorische Kraft des Aktionsstromes kann so groß sein, daß durch ihn ein zweiter Muskel oder ein Nerv erregt werden kann. In Erkenntnis dieser Tatsache mußte es merkwürdig erscheinen, daß ein tätiger Muskel innerhalb des Organismus niemals die benachbarten Muskeln und Nerven in Erregung versetzt. Offenbar bilden die umliegenden Gewebe so gute Nebenschließungen, daß die Aktionsströme wesentlich an Wirksamkeit einbüßen.

Der zeitliche Verlauf des Aktionsstromes ist abhängig von der Art und dem Zustand des untersuchten Muskels. Flinker reagierende Muskeln oder Muskeln bei höherer Temperatur zeigen einen rascheren Verlauf des Aktionsstromes. Nach Garten dauert der aufsteigende Schenkel des Aktionsstromes beim Schneidermuskel des Frosches $^2/_{1000}$ Sekunden. Der absteigende Schenkel nimmt etwa die fünffache Zeit in Anspruch. Bei Verlangsamung der Erregungsvorgänge wird der Verlauf beider Teile des Aktionsstromes verlangsamt, jedoch der absteigende Schenkel des Aktionsstromes wesentlich mehr. Diese auffallende Verlangsamung des absteigenden Schenkels des Aktionsstromes wird als negative Nachwirkung bezeichnet. Bei vielen Muskeln nimmt beim Durchlaufen der Erregungswelle über den Muskel die Intensität der Erregungswelle ab. Dieses Verhalten wird deutlich, wenn wir den Aktionsstrom von zwei Längsschnittstellen eines parallelfaserigen Muskels ableiten. Wir sehen dann, wie dies Kurve 10 zeigt, bei Reizung des Muskels an einem Ende, daß die elektromotorische Kraft an der Ableitungsstelle, die weiter von der Reizstelle entfernt liegt, geringer ist. Wir bezeichnen dieses Abnehmen der Intensität der Erregungswelle bei der Erregungsleitung als Dekrement. Aus den Kurven ersehen wir ferner, daß das Maximum der elektromotorischen Kraft, an der Ableitungsstelle, welche der Reizstelle näher liegt, schneller erreicht wird. Wir müssen aus dieser Verlangsamung des aufsteigenden Schenkels

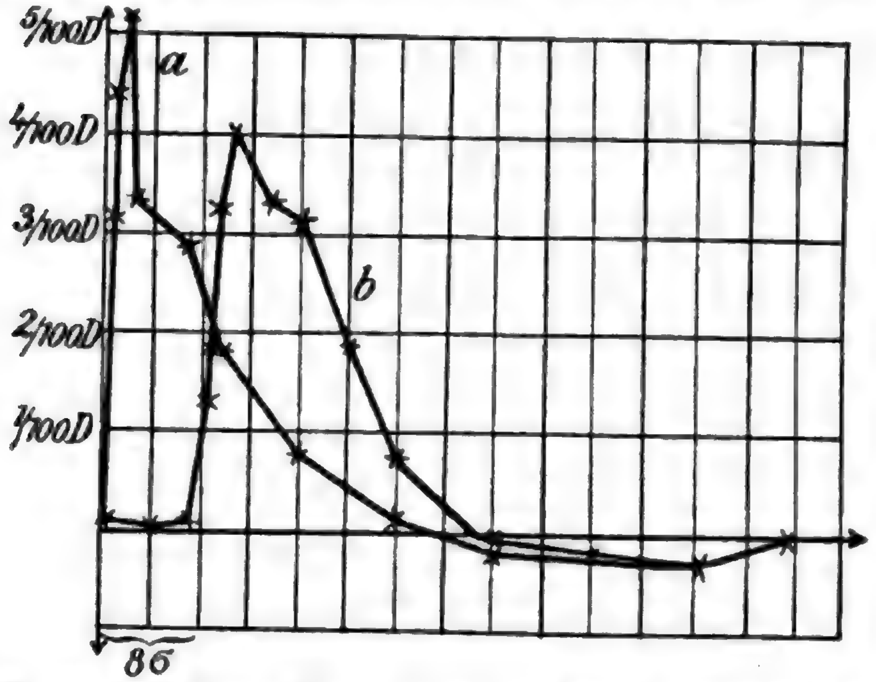


Fig 10. Veränderung des Aktionsstroms beim Durchlaufen eines Muskels. Die Kurve b ist von einer Stelle abgeleitet, welche von der Reizstelle weiter entfernt ist. Nach Garten.

Digitized by Google

schließen, daß neben dem Dekrement der Intensität der Erregungswelle auch ein Dekrement der Fortpflanzungsgeschwindigkeit einhergeht.

Bei Reizung des Muskels mit einem konstanten Strom treten häufig, wie Figur 11

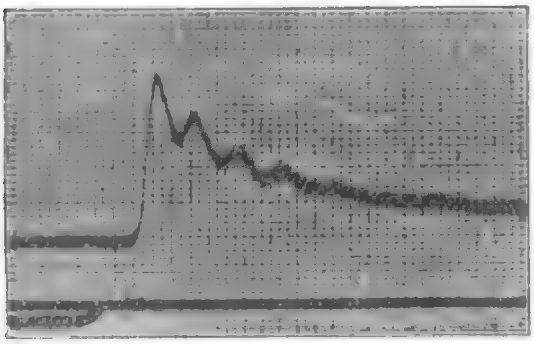


Fig. 11. Rhythmische Aktionsströme des Froschmuskels bei direkter Reizung mit dem konstanten Strom. Nach Dittler und Tichomirow.

zeigt, rhythmische Aktionsströme auf (Buchanan, Garten). Die Frequenz dieser rhythmischen Aktionsströme ist gleichfalls von der Art und dem Zustand des gereizten Muskels abhängig. Beim Froschmuskel hat Buchanan Frequenzen von 50 bis 100 Wellen in der Sekunde beobachtet. Beim Kaninchenmuskel sollen sogar Frequenzen von 250 Wellen in der Sekunde erreicht werden. Bei den träge reagierenden Muskeln des Zwerchfelles sind Frequenzen von 30 Wellen in der Sekunde beobachtet worden. Rhythmische Aktionsströme werden auch bei der willkürlichen Innervation des Muskels und bei Reizung des Muskelnerven mit dem konstanten Strom beobachtet. Figur 12 zeigt

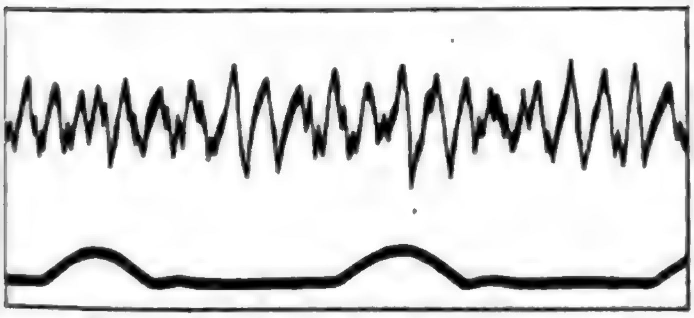


Fig. 12. Rhythmische Aktionsströme des menschlichen Muskels bei willkürlicher Innervation. Die untere Kurve gibt die Zeit in $^1/_5$ Sekunden. Nach Piper.

die rhythmischen Aktionsströme eines menschlichen Muskels bei willkürlicher Innervation. Die rhythmischen Aktionsströme des direkt gereizten Muskels stellen eine weit verbreitete Form der Reizbeantwortung vor, sie scheinen, wie Fröhlich hervorgehoben hat, in naher Beziehung zu Polarisationsvorgängen an der lebendigen Substanz zu stehen. Wir sehen nach Aufladung von Polarisationszellen rhythmische Entladungen auftreten, die in mehrfacher Hinsicht mit den rhythmischen Aktionsströmen übereinstimmen.

Wenn wir einen konstanten Strom durch einen Muskel hindurchschicken, so treten uns bei Schließung und Oeffnung des Stromes gesetzmäßige Erregungserscheinungen entgegen. Dieselben haben im Artikel „Muskeln, allgemeine Physiologie der Muskeln" bei Behandlung der polaren Erregungsgesetze eine eingehende Erörterung erfahren. Ein- und Austrittsstelle des Stromes werden bei Schließung und Oeffnung des Stromes elektromotorisch wirksam. Die Gesamtheit dieser Erscheinungen bezeichnen wir als Elektrotonus. Nach Schließung des Stromes läßt sich an der Kathode ein Strom nachweisen, der vom unverletzten Längsschnitt zu der Kathode fließt, an der Anode dagegen fließt der Strom von der Anode weg. Wir sprechen von einem negativ-kathodischen und positiv-anodischen Strom. Ersterer ist mit einer Verkürzung an der Kathode, letzterer mit einer Erregbarkeitsherabsetzung bezw., wenn der Muskel kontrahiert war, mit einer Erschlaffung an der Anode verbunden. Nach Oeffnung des konstanten Stromes erhalten wir an der Kathode einen Strom, der von der Kathode zum unverletzten Längsschnitt, an der Anode zur Anode fließt. Wir sprechen in diesem Falle von einem positiv-kathodischen und einem negativ-anodischen Nachstrom. Dem Auftreten des positiv-kathodischen Nachstroms entspricht eine Erregbarkeitsherabsetzung des Muskels, die, falls der Muskel kontrahiert war, mit einer Erschlaffung des Muskels an der Kathode einhergeht. Der negativ-anodische Nachstrom ist dagegen von einer Kontraktion an der Anode begleitet. Dem negativ-kathodischen und dem negativ-anodischen Nachstrom entsprechen nach Hering die Schließungserregung an der Kathode und die Oeffnungserregung an der Anode.

β) Glatte Muskeln (vgl. den Artikel „Muskeln"). Die glatte Muskulatur ist aus kurzen Muskelzellen zusammengesetzt. Bei ihnen kann die Erregungsleitung von Muskelzelle zu Muskelzelle erfolgen. Es ist aber mehr als wahrscheinlich, daß am unverletzten Tier die Erregungsleitung über einen glatten Muskel nur durch die Vermittlung des Nervensystems erfolgt. Die Erregungsleitung ist aber am isolierten Muskel so ausgebildet, daß ein glatter Muskel bei Reizung sich wie eine einzige große Muskelfaser kontrahiert. Die Kontraktion beginnt an der Reizstelle und pflanzt sich wellenförmig über den ganzen Muskel fort. Wenn wir von einer unverletzten zu einer verletzten Stelle eines Muskels ableiten, erhalten wir einen Demarkationsstrom. Die elektromotorische Kraft dieses Demarkationsstromes

Digitized by Google

ist jedoch weit geringer als bei den quergestreiften Muskeln. Die Demarkationsströme zeigen ferner die Eigenschaft sehr schnell zu verschwinden und bei der Anlegung einer neuen Verletzung in ursprünglicher Strärke wiederzukehren. Dies hängt mit der Zusammensetzung der glatten Muskeln aus kurzen Muskelfasern zusammen. Diese sterben bei Verletzung rasch ab und das Absterben schreitet nicht fort, wie bei den langen Fasern der quergestreiften Muskeln. Wir leiten also eigentlich von zwei unverletzten Stellen des Muskels ab. Die geringe elektromotorische Kraft der Demarkationsströme ist zum Teil wenigstens auf die tonische Verkürzung zurückzuführen, in welche viele glatte Muskeln nach der Trennung vom Tierkörper verfallen. Eine andauernde tonische Verkürzung finden wir bei den quergestreiften Muskeln nur bei Innervation vom Zentralnervensystem aus oder bei abnormen Zuständen z. B. bei der Vergiftung mit dem Alkoloid Veratrin. Der Tonus glatter Muskeln entspricht, wie wir heute mit Bestimmtheit sagen können, gleichfalls einem Erregungszustand. Von einem tonisch erregten Muskel müssen wir einen kleineren Demarkationsstrom erhalten als von einem erschlafften Muskel. Dem entsprechend sehen wir eine Zunahme des Demarkationsstromes, wenn wir den tonisch kontrahierten Muskel z. B durch Erwärmung zur Erschlaffung bringen oder unter möglichster Fernhaltung von Reizen warten, bis der Tonus verschwindet.

Bei den glatten Muskeln treten uns zwei Erscheinungen entgegen, die wir als positive Schwankung und positive Nachschwankung des Demarkationsstromes bezeichnen. Haben wir einen tonisch kontrahierten Muskel vor uns, der nur einen geringen Demarkationsstrom aufweist, und bringen wir den Muskel durch Reizung eines den Tonus hemmenden Nerven zur Erschlaffung, so sehen wir während der Reizung den Demarkationsstrom zunehmen, es tritt eine positive Schwankung des Demarkationsstromes ein. Nach Aufhören der Reizung kehrt der Demarkationsstrom zur anfänglichen Größe zurück. Bei anderen Muskeln tritt uns die gleiche Erscheinung in etwas anderer Form entgegen. Reizen wir z. B. die glatten Muskeln des Froschmagens oder der Harnblase, welche sich in tonischer Verkürzung befinden, so erhalten wir bei jedem Reiz eine Verkürzung des Muskels, die aber von einer zunehmenden Erschlaffung gefolgt ist. Jeder Verkürzung entspricht eine negative Schwankung des Demarkationsstromes, der Abnahme des Tonus dagegen entspricht eine Zunahme des Demarkationsstromes. Nach Beendigung der Reizung kann der Demarkationsstrom noch weiter zunehmen, um erst allmählich zum anfänglichen Wert abzusinken. Wir bezeichnen diese Erscheinung als positive Nachschwankung. Eine solche positive Schwankung bezw. Nachschwankung läßt sich auch an den quergestreiften Muskeln beobachten, wenn ihr durch das Zentralnervensystem vermittelter Tonus gehemmt wird.

Rhyhtmische Aktionsströme lassen sich auch, wie v. Brücke gezeigt hat, an den glatten Muskelfasern des Retraktor Penis nachweisen. Ich habe an verschiedenen Stellen besonders darauf aufmerksam gemacht, daß die rhythmische Reizbeantwortung besonders leicht an lebendigen Systemen mit geringer Reaktionsgeschwindigkeit hervortritt. Wir müßten also erwarten, daß sich rhythmische Erregungswellen insbesondere leicht an glatten Muskeln nachweisen lassen. Der Retraktor Penis zeigt in der Tat nur eine Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Erregungswelle, die nach v. Brücke zwischen 0,9 und 7 mm in der Sekunde schwankt. Der aufsteigende Schenkel des Aktionsstromes dauert 0,5 bis 4 Sekunden. Wenn wir auch erwarten müssen, daß alle träg reagierenden Muskeln Reize mit rhythmischen Erregungswellen beantworten, so ist damit noch nicht gesagt, daß wir die rhythmischen Aktionsströme bei jedem glatten Muskel auch nachweisen können. Nur zu leicht könnten die rhythmischen Erregungswellen in ungeordneter Weise an verschiedenen Stellen des Muskels ablaufen und dadurch ein Hervortreten der einzelnen Aktionsströme unmöglich machen.

γ) Herzmuskel (vgl. den Artikel „Muskeln"). Die Elektrizitätsproduktion des Herzmuskels hat in letzter Zeit an Interesse gewonnen, da sie zur Diagnose von Herzkrankheiten verwendet werden kann. Die Methode ist jetzt so vereinfacht, daß man schon nach wenigen Minuten das fertige Kardioelektrophotogramm des Untersuchten erhalten kann. Es ist sogar möglich, das Galvanometer durch elektrische Leitung mit mehreren Kliniken zu verbinden und so die Herztätigkeit eines meilenweit entfernten Kranken zu registrieren (Telelektrokardiogramm). Die Ableitung des Elektrokardiogramms vom Menschen wird dadurch begünstigt, daß das Herz nach links von der Mittelebene des Körpers liegt und seine Längsachse schräg zur Längsachse des Körpers steht. Die Herzströme verteilen sich infolgedessen nicht in allen Teilen des Körpers in gleicher Weise und es bestehen Unterschiede der Ableitung vom rechten zum linken Arm oder vom rechten Arm zum linken Fuß (vgl. die Figur 13). Soll der Strom von beiden Armen abgeleitet werden, so taucht die zu untersuchende Person ihre Arme in zwei isolierte, mit Kochsalzlösung gefüllte Wannen und entspannt dann die Muskeln. Die Ableitung der Ströme zum Galvanometer geschieht durch Metallelektroden, welche in die Kochsalzlösung der Wannen eintauchen.

Digitized by Google

Ein solches Elektrokardiogramm ist Figur 14 wiedergegeben. Es sei aber gleich erwähnt,

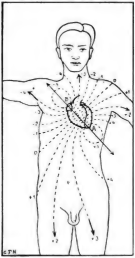


Fig. 13. Verteilung der vom Herzen ausgehenden Ströme im Körper. Nach Nikolai.

sich aus einem s-förmig gekrümmten Muskelschlauch, bei dem die Kontraktionswellen von den Eintrittsstellen des Blutes zu den Austrittstellen, zur Aorta verlaufen. Auch über Entstehung der Zacken Q und S kann man nur Annahmen äußern. Wenn wir bedenken, daß das sich entwickelnde Herz einen Muskelschlauch vorstellt, der von einer Schichte Längs- und Ringmuskeln gebildet wird, die beim Ablaufen der Kontraktionswellen über den Herzmuskeln in antagonistische Beziehungen treten, so können wir die Zacken Q und S auf die verschiedene Beteiligung der Längs- und Ringmuskeln bei der Kontraktion des Herzen zurückführen. Hier wird uns vielleicht die elektrophysiologische Untersuchung verschiedener peristaltischer Bewegungen, die ja der Bewegung des Herzmuskels am nächsten stehen, Aufschluß geben können.

Auch der Herzmuskel weist rhythmische Aktionsströme auf. Nach den vergleichenden Untersuchungen von P. Hofmann liegen jeder Herzkontraktion einzelner niederer Tiere rhythmische Aktionsströme zugrunde. Die Figur 15 zeigt uns ein derartiges Elektrokardiogramm von einem Krebs.

Verletzen wir eine Stelle des Herzens, so läßt sich bei Ableitung von dieser und einer unverletzten Stelle ein Demarkationsstrom nachweisen.

2b) Elektrische Organe. Wie die

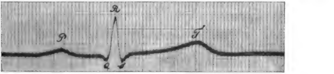


Fig. 14. Elektrokardiogramm vom Menschen. Nach Einthoven.

daß das Elektrokardiogramm eines gesunden Menschen auch anders aussehen kann, — es gibt nach Einthoven kein Normalelektrokardiogramm — und daß die Deutung einzelner Zacken noch nicht sicher ist. Die Zacke P entspricht der Vorhofskontraktion, die Zacke R der Kontraktion der Kammermuskeln. In der Zeit zwischen P und R findet die Uebertragung der Erregung durch das His-Tavarasche Uebergangsbündel vom Vorhof zur Kammer statt. Ueber die Deutung der Zacke T besteht noch keine Einigkeit. Die Untersuchungen machen es wahrscheinlich, daß die Zacke T dadurch zustande kommt, daß die Erregungswellen der Herzkammern erst von der Basis zur Spitze, und dann von der Spitze zur Aorta verlaufen. Das menschliche Herz entwickelt

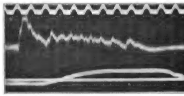


Fig. 15. Elektrokardiogramm vom Limulus. Die unterste Kurve gibt die Kontraktion des Herzmuskels wieder. Nach P. Hoffmann.

Untersuchungen von Babuchin und Engelmann gezeigt haben, stehen die elektrischen

Google

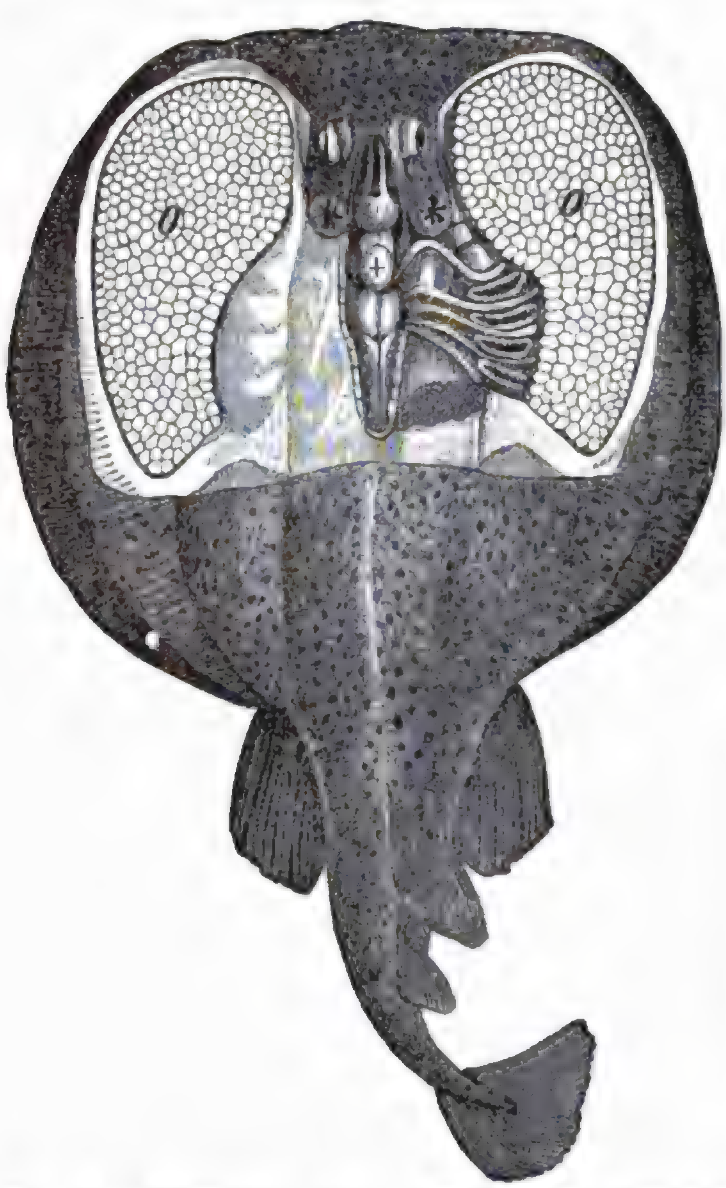


Fig. 16. Elektrisches Organ von Torpedo marmorata. Nach Fritsch.

(Torpedo occidentalis) im atlantischen Ozean, Torpedo marmorata und occellata im Mittelmeer, der Zitterwels (Malopterurus electricus) in den Flüssen Nordafrikas, Raja im Mittelmeer, Mormyrus im Nil. Nach neueren Angaben soll es in Kleinasien Schnecken geben, die elektrische Schläge austeilen können. Die Figuren 16, 17 und 18 gewähren Einblick in den Bau der elektrischen Organe. Die Erkenntnis, daß die elektrischen Organe in so naher Beziehung zu den Muskeln stehen, hat sie ihrer Sonderstellung beraubt, die sie bis dahin eingenommen hatten.[4] Insbesondere bei jenen elektrischen Organen, die nur schwache Schläge erteilen können und die aus diesem Grunde früher fälschlich als pseudoelektrische bezeichnet worden sind, erfolgt die Umwandlung der kontraktilen Muskelfasern in Substanz der elektrischen Organe erst im postembryonalen Leben. Die stark elektrischen Organe machen diese Umwandlung schon in einem früheren Entwickelungsstadium durch. Nur das elektrische Organ des Zitterwels scheint sich nicht aus einer Muskelanlage, sondern aus Zellen der Haut zu bilden. Es bildet eine Verdickung der Haut und bedeckt fast den ganzen Fischkörper. Es unterscheidet sich, wie wir unten hören werden, von den

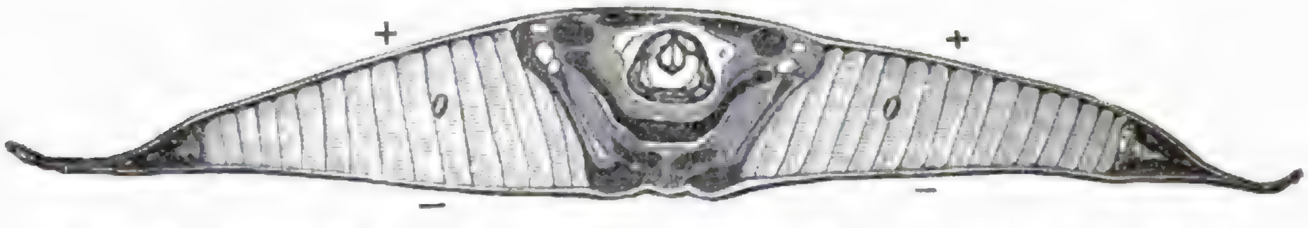


Fig. 17. Querschnitt durch das elektrische Organ von Torpedo ocellata. Nach Fritsch.

anderen elektrischen Organen durch die Richtung, in der sich der Strom entlädt.

Das Verhältnis der Organgröße zur Tiergröße ist bei den verschiedenen elektrischen Fischen verschieden. Nach Du Bois-Reymond beträgt dieses Verhältnis bei den stärksten elektrischen Fischen 1:2,66. Die Entladungsstärke ist in erster Linie abhängig von der Größe des Organs, sie ist natürlich auch abhängig von der Entladungsstärke jedes einzelnen Organteils.

Organe entwickelungsgeschichtlich den Muskeln sehr nahe. Die Anatomie der elektrischen Organe ist besonders durch Ballowitz, Fritsch und Bilharz untersucht worden. Die Physiologie der elektrischen Organe ist in der Elektrophysiologie von Biedermann und in dem Kapitel Elektrizitätsproduktion von Garten im Handbuch der vergleichenden Physiologie in umfassender Weise dargestellt worden.

Elektrische Organe besitzen der Zitteraal (Gymnotus electricus), der in den Flüssen Südamerikas vorkommt, der Zitterrochen

Die elektrischen Organe sind, wie die Figuren 16 und 17 zeigen, aus einzelnen Säulen

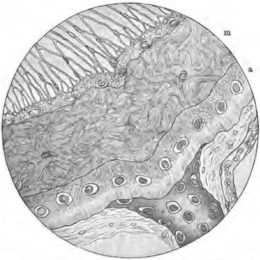


Fig. 18. Elektrische Platte von Raja. n Nervenschicht, m umgewandelte Muskelfasern, a Alveolarschicht. Nach Ewart.

und diese wieder aus einzelnen Platten aufgebaut oder sie bestehen nur aus Platten. Jede einzelne Platte trägt auf der einen Seite die Nervenausbreitung, die übrige Plattensubstanz entwickelt sich aus der Muskelanlage und läßt, wie z. B. bei den Platten von Raja und Mormyrus (Fig. 18), noch eine Querstreifung erkennen. Die ganze Platte ist von einer Scheide umgeben, dem Elektrolemm. Die einzelnen Platten sind durch Gallertschichten voneinander getrennt. Die Zahl der Platten, die beim Wachstum des Tieres keine Vermehrung erfährt, kann beim Zitteraal 6000 bis 8000 betragen. Die Ganglienzellen, welche die elektrischen Organe innervieren, liegen beim Zitteraal in verschiedenen Abschnitten des Rückenmarks. Von ihnen gehen 350 Nerven zu den elektrischen Platten. Beim Zitterrochen liegen die Ganglienzellen in einem eigenen nervösen Organ, dem elektrischen Lappen, der dem verlängerten Mark anliegt und 4 Nervenstämme aussendet. Das elektrische Organ des Zitterwelses wird auf jeder Seite nur von einer einzigen Nervenfaser versorgt, die von einer großen Ganglienzelle kommt. Sie liegt im oberen Abschnitte des Rückenmarks und ist bei geeigneter Schnittführung schon mit freiem Auge wahrnehmbar. Der Nerv teilt sich in zahllose Fasern, die zu den einzelnen Platten hinziehen. Die Nerven verlieren, bevor sie an die Platte herantreten, ihre Markscheide. Bei Abtötung einer Stelle des Organs lassen sich starke Demarkationsströme beobachten, die aber rasch verschwinden. Die Aktionsströme des gereizten Organs können große Spannungen erreichen, beim Zitteraal selbst über 400 Volt. D'Arsonval konnte mit dem Schlag vom Torpedo ein Glühlämpchen von 4 Volt zum hellen Aufleuchten bringen. Gotch und Burch haben an einem Achtel des Organes vom Zitterwels eine elektromotorische Kraft von 25 Volt festgestellt. Man kann daher für die Entladung des ganzen Organes 200 Volt annehmen. Der von Gotch und Burch benützte Organteil enthielt an 530 Platten. Die einzelne Platte würde demnach eine elektromotorische Kraft von 0,048 Volt haben. Diese elektromotorische Kraft hält sich innerhalb der Grenzen der Aktionsströme eines quergestreiften Muskels. Die großen elektromotorischen Kräfte elektrischer Organe kommen nur durch die große Zahl der Platten, ihre gleichzeitige Erregung und günstige Anordnung zustande. Auffallend ist die lange Zeit, die zwischen Reizmoment und Beginn der Entladung vergeht. Die Latenzzeit kann $^{3}/_{1000}$ bis $^{4}/_{1000}$ Sekunden betragen. Bemerkenswert ist ferner die geringe Reizbarkeit der elektrischen Organe durch den elektrischen Strom.

Die Richtung der Schläge geht, wie Paccini festgestellt hat, außerhalb der Platte von dem muskulären Teil zur Nervenendausbreitung. Nur beim Zitterwels geht der Strom in umgekehrter Richtung.

Auch am elektrischen Organ tritt uns die rhythmische Reizbeantwortung entgegen, d. h. jeder einzelne Schlag läßt sich in eine schnelle Folge von Aktionsströmen auflösen. Beim Zitterwels beträgt die Dauer jeder einzelnen Stromwelle bei einer Temperatur von 35° Celsius 1,1 bis 1,3 σ ($\sigma = {}^{1}/_{1000}$ Sec). Bei 15° haben sie eine Dauer von 8 σ. Auch das vom Zentralnervensystem getrennte Organ läßt bei Reizung rhythmische Entladung erkennen. Beim unverletzten Tier

wird der Rhythmus durch die Erregungen bestimmt, die vom Zentralnervensystem kommen. Garten hat am Zitterwels den experimentellen Nachweis dieser Tatsache erbracht. Garten erhielt bei Abkühlung des Zentralnervensystems eine Verlangsamung des Rhythmus, während der Rhythmus bei Abkühlung des elektrischen Organs unverändert blieb. Nach vielen Entladungen, manchmal über 1000, tritt Ermüdung ein. Das ermüdete Organ reagiert, wie Röhmann gezeigt hat, sauer.

Das entnervte elektrische Organ zeigt keine elektrischen Entladungen. Die Unfähigkeit zur Entladung tritt ein nach Entartung der Nerven oder nach Lähmung der Nervenenden durch starke Curaredosen. Auch bei der Ermüdung schwindet, wie Garten gezeigt hat, gleichzeitig mit der indirekten Erregbarkeit vom Nerven aus die direkte. Ist die Erregbarkeit des Organs geschwunden, dann ist es auch nicht mehr möglich, durch Verletzung einer Stelle einen Demarkationsstrom hervorzurufen. Nach Gotch stellt eben das Nervenendorgan mit der Platte das elektrisch Wirksame vor. Auch beim Muskel müssen wir an der Uebergangsstelle vom Nerv zum Muskel eine besonders differenzierte Substanz annehmen. Sie ist als reizaufnehmende bezw. als rezeptive Substanz bezeichnet worden. An ihr spielen sich alle jene Vorgänge ab, die früher dem Nervenendorgan zugeschrieben worden sind (vgl. die allgemeine Physiologie der Muskeln im Artikel „Muskeln").

2c) Nervensystem. *α*) Zentralnervensystem. Es ist möglich, auch vom Zentralnervensystem Demarkations- und Aktionsströme abzuleiten; doch sind die Deutungen der Ströme wegen des komplizierten Baues des Nervensystems schwierig. Vor allem ist es schwer zu entscheiden, ob der Strom auf die Vorgänge in den intrazentralen Nervenfasern oder in den Ganglienzellen zurückzuführen ist. Wird zum Beispiel eine Stelle des Großhirns verletzt, so verhält sie sich gegenüber einer ungeschädigten Großhirnstelle negativ. Wird von einer unverletzten Stelle abgeleitet und dann dieselbe reflektorisch in Erregung versetzt, so erhält man einen Aktionsstrom (Gotch und Horsley).

Die Schwierigkeit, die Resultate zu deuten, ist der Grund dafur, daß nur wenige Untersuchungen über die Elektrizitätsproduktion des Zentralnervensystems ausgeführt worden sind. Zum Studium der Zentrenfunktion hat man sich fast ausschließlich indirekter Methoden bedient, d. h. man hat die Tätigkeit der innervierten Nerven und Muskeln beoabchtet.

β) Die Nerven. Ueber die Elektrizitätsproduktion der Nerven besitzen wir eine Fülle von Erfahrungen. Zwischen der Elektrizitätsproduktion markhaltiger und markloser Nerven bestehen keine wesentlichen Unterschiede (vgl. Physiologie des Nervensystems im Artikel „Nervensystem").

Auch die Nerven weisen einen Demarkationsstrom auf, wenn man von einer unverletzten Stelle zum Querschnitt ableitet. Jede verletzte oder auf andere Weise geschädigte Nervenstelle verhält sich negativ gegenüber den unverletzten Stellen. Die Demarkationsströme sind bei den Nerven der kaltblütigen Tiere stärker als bei den Warmblütern, sie sind bei den marklosen Nerven stärker als bei den markhaltigen. Am markhaltigen Nervus vagus des Hundes beträgt die elektromotorische Kraft des Demarkationsstromes nur 0,004 bis 0,006 Volt. Am Beinnerven des Frosches kann sie 0,02 Volt betragen. Am marklosen Hummernerven wurden elektromotorische Kräfte von 0,042 bis 0,048 eines Daniell-Elementes beobachtet. Die geringere elektromotorische Kraft der Warmblüternerven mag mit dem Umstand zusammenhängen, daß sie entsprechend ihrer starken Abhängigkeit von der Blutversorgung einen intensiven Ruhestoffwechsel aufweisen, der bewirkt, daß die Differenz im chemischen Geschehen zwischen Längs- und Querschnitt nicht groß ist. Die geringe Differenz zwischen Längs- und Querschnitt könnte auch dadurch veranlaßt sein, daß der vom Tierkörper getrennte Warmblüternerv durch Sauerstoffmangel geschädigt ist.

Mit dem Demarkationsstrom hängt enge der Axialstrom zusammen. Leitet man von zwei Querschnitten eines Nerven ab, so kann man einen Strom, den Axialstrom beobachten. Nach Weiß ist der Axialstrom zurückzuführen auf die größere Menge an Bindegewebe an dem einen Querschnitt. Legen wir an dem Beinnerven des Frosches zwei Querschnitte an, so ist jener Querschnitt, der gegen das Rückenmark liegt, der dickere und bindegewebsreichere. Er ist elektromotorisch weniger wirksam, offenbar weil das Bindegewebe als Nebenschließung wirkt und nur weniger Strom nach außen wirksam wird.

Mit der elektromotorischen Kraft der Aktionsströme verhält es sich so wie mit den Demarkationsströmen. An den marklosen Nerven lassen sich in der Regel stärkere Aktionsströme nachweisen. Garten konnte an zwei aneinandergelegten Beinnerven vom Kaninchen Aktionsströme von 0,0015 eines Daniellelementes messen. Zwei Beinnerven vom Frosch gaben Aktionsströme von 0,004 Daniell.

Interessant sind die Beziehungen des zeitlichen Verlaufs der Aktionsströme zur

Digitized by Google

Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Erregung im Nerven. Bei schnell leitenden Nerven erreicht der Aktionsstrom viel rascher sein Maximum. Der Aktionsstrom des Warmblüternerven kann schon nach 0,0055 σ sein Maximum erreichen, während der Aktionsstrom des marklosen Teichmuschelnerven dazu $^1/_5$ Sekunde braucht (Garten). Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Erregung im Warmblüternerven kann Werte bis zu 120 m in der Sekunde erreichen. Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Erregung beim Muschelnerven beträgt nur 10 mm in der Sekunde. Werden die Lebensvorgänge eines Nerven z. B. durch Abkühlung oder Narkose verlangsamt, dann wird die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Erregung verlangsamt, und die Aktionsströme brauchen zur Erreichung ihres Maximums längere Zeit.

Bei Reizung der Nerven mit dem konstanten Strom treten rhythmische Aktionsströme auf, die beim Warmblüternerven eine Frequenz von nahezu 1000 Aktionsströmen in der Sekunde erreichen können. Figur 19 zeigt eine solche Kurve, die bei Reizung eines Froschnerven mit dem konstanten Strom erhalten wurde. Rhythmisch sind die Aktionsströme auch bei willkürlicher Innervation, doch werden diese Rhythmen durch Impulse erzeugt, die den Nerven von ihren Ganglienzellen zugehen. Dittler hat vom Zwerchfellnerven bei natürlicher Innervation 30 bis 120 Aktionsstromwellen in der Sekunde ableiten können. Es ist jedoch bisher nicht gelungen die rhythmische Natur der Erregung in den sensiblen Nerven nachzuweisen. Bei Reizung des Auges durch Licht, des Gehörorganes durch Schall, bei mechanischer Reizung der Haut, bei Aufblähung der Lunge lassen sich von den sensiblen Nerven dieser Organe andauernde Ströme ableiten, die vielfach zur Annahme verleitet haben, daß durch die sensiblen Nerven ein kontinuierlicher Erregungsvorgang geleitet werden kann. Die Untersuchungen zur allgemeinen Physiologie der Nerven haben jedoch gezeigt daß im Nerven nur Erregungswellen sich fortpflanzen und niemals ein kontinuierlicher Erregungsvorgang geleitet wird. Wir müssen demnach annehmen, daß die rhythmische Natur der Erregungen der Sinnesnerven nicht nachweisbar ist, weil die Impulse zu schwach sind oder so ungeordnet von den Sinnesorganen ausgehen, daß die einzelnen Phasen der Aktionsströme miteinander interferieren und daher nicht hervortreten können.

Nach einer Reizung, insbesondere nach einer längerdauernden, schließt sich, wie E. Hering gezeigt hat, an die negative Schwankung des Demarkationsstromes eine positive Schwankung, die positive Nachschwankung, an. Figur 20 zeigt eine solche positive Nachschwankung. Die positive Nachschwankung läßt sich nur schwer am Warmblüternerven nachweisen. Beim Kaltblüternerven tritt sie schon nach kurzdauernden faradischen Reizungen hervor. Am marklosen Riechnerven des Hechtes konnte sie Hering schon nach einer kurzdauernden mechanischen Reizung beobachten. Bei wiederholten faradischen Reizungen des Froschnerven nimmt die positive Nachschwankung erst zu, um dann wieder abzunehmen. Schließlich folgt der faradischen Reizung keine Nachschwankung

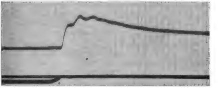


Fig. 19. Rhythmische, negative Schwankung eines Kaltfroschnerven bei Reizung mit dem konstanten Strom. Die Erhebung der untersten Linie bezeichnet den Reizmoment. Nach Garten.

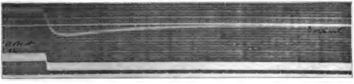


Fig. 20. Positive Nachschwankung des Nervenstromes. Die Senkung der breiten Linie zeigt das Aufhören der Reizung, die zweite Linie von oben die Ruhelage der Saite vor Beginn der Reizung an. Nach Garten.

Digitized by Google

mehr. Wie Garten gezeigt hat, spielt sich der Vorgang, welcher der positiven Nachschwankung zugrunde liegt, am Längsschnitt des Nerven ab. Bei Abkühlung der Ableitungsstelle am Längsschnitt verschwindet die positive Nachschwankung, ohne daß die Aktionsströme eine wesentliche Veränderung aufweisen. Dasselbe findet statt bei Sauerstoffmangel des Nerven, wie Zeliony gezeigt hat. Aus Nerven des Sommerfrosches konnte Zeliony durch Sauerstoffzufuhr zu der Ableitungsstelle am Längsschnitt eine Zunahme der positiven Nachschwankung herbeiführen.

Die positive Nachschwankung ist deshalb von Bedeutung, weil sie uns Aufschluß geben kann über das, was in der lebendigen Substanz nach einem Reiz vor sich geht. Die positive Nachschwankung könnte im Sinne Herings Ausdruck einer autonomen aufsteigenden Aenderung der lebendigen Substanz sein, und man könnte sich vorstellen, daß sie vielleicht in Zusammenhang steht mit der Massenzunahme jeder lebendigen Substanz nach häufiger Reizung, daß also eine Beziehung besteht zwischen positiver Nachschwankung und Arbeitshypertrophie. Aber es wäre noch eine andere Deutung möglich, auf die ich in Uebereinstimmung mit Cremer aufmerksam machen möchte. Sie steht in Beziehung zu den positiven Nachschwankungen, die wir nach Reizung tonisch kontrahierter Muskeln beobachten können. Man könnte sich vorstellen, daß der Längsschnitt des Nerven sich schon vor der Reizung in einer schwachen Erregung befindet, die aufrecht erhalten wird durch schwache Reize, die sich von keiner lebendigen Substanz vollständig fernhalten lassen und die um so besser wirken, je höher die Erregbarkeit ist. Ein schwacher Erregungsvorgang im Nerven hat einen geringeren Demarkationsstrom zur Folge. Durch eine faradische Reizung setzen wir die Erregbarkeit des Nerven für die schwachen Reize herab. Man vergleiche das im Artikel „Nervensystem“ (allgemeine Physiologie des Nervensystems) über relative Ermüdung Gesagte. Nach Aufhören der Reizung befindet sich der Nerv in einem geringeren Erregungszustand als vor der Reizung und das kommt in einer Zunahme des Demarkationsstromes, der positiven Nachschwankung zum Ausdruck. In dem Maße als die anfängliche Erregbarkeit wiederkehrt, stellt sich die Wirksamkeit der schwachen Reize wieder her; der Demarkationsstrom nimmt wieder ab. Der Verlauf der positiven Nachschwankung entspricht vollkommen der Restitution der Erregbarkeit nach einer Reizung. Die Erregbarkeit kehrt zuerst rascher, dann immer langsamer zur anfänglichen Höhe zurück.

Bei Durchströmung eines Nerven mit dem konstanten Strom zeigen sich bei Schließung und Oeffnung an der Ein- und Austrittsstelle des Stromes Zustandsänderungen, die wir als Elektrotonus bezeichnen (vgl. allgemeine Physiologie des Nervensystems im Artikel „Nervensystem“). Die komplizierten Erscheinungen im elektrischen Verhalten des Nerven während des Elektrotonus sind besonders von Du Bois-Reymond, Hermann, Bernstein, Pflüger, Hering und Biedermann untersucht worden. Einige umfassende Darstellungen dieses Forschungsgebietes, die keineswegs leicht zu verstehen sind, finden sich in dem Werke Du Bois-Reymonds über tierische Elektrizität, im Buche Pflügers über den Elektrotonus und in Biedermanns Elektrophysiologie. Bei den nach Schließung und Oeffnung des elektrischen Stromes auftretenden Schwankungen des Demarkationsstromes sind 3 Komponenten beteiligt: 1. die Aktionsströme, die bei der Schließung von der Kathode, bei der Oeffnung von der Anode ausgehen und in Form von rhythmischen Aktionsströmen zum Ausdruck kommen können, 2. die Stromschleifen, die von den Zuleitungsstellen des konstanten Stromes auf die Ableitungsstellen zum strommessenden Instrument übergreifen können (physikalischer Elektrotonus), 3. die elektrotonischen Ströme (physiologischer Elektrotonus).

Wird ein markhaltiger Nerv von einem konstanten Strom durchflossen, so wird nicht nur die Eintrittsstelle positiv zu den anderen Nervenstellen, sondern die ganze außerhalb der Anode liegende Nervenstrecke wird in abnehmender Stärke positiv. Die außerhalb der Kathode liegende Strecke wird negativ. Bei der Oeffnung des konstanten Stromes finden, entsprechend dem polaren Erregungsgesetz, die gegensinnigen Aenderungen an Anode und Kathode, wenn auch in weit schwächerem Grade statt.

Die Ausbreitung der elektrotonischen Veränderungen erfolgt nicht plötzlich über die ganze Nervenstrecke, sondern mit einer Geschwindigkeit, die etwas geringer ist als die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Erregungswelle. Durch die weite und schnelle Ausbreitung der elektrotonischen Veränderungen unterscheidet sich der markhaltige Nerv vom marklosen Nerven und vom Muskel. Bei diesen bleibt der Elektrotonus mehr oder weniger auf die Ein- und Austrittsstelle des konstanten Stromes beschränkt. Die Bedingung für die Ausbreitung des Elektrotonus liegt in der Markscheide des Nerven. Durch eine Polarisation, welche zwischen Markscheide und Achsenzylinder stattfindet, kann ein so großer Widerstand entstehen, daß der Strom einen weiteren Weg einschlägt und jetzt längere Nervenstrecken in den Zustand des Elektrotonus versetzt.

Digitized by Google

Dadurch daß zuerst eine Polarisation erfolgen muß, bevor der benachbarte Teil des Nerven in den Zustand des Elektrotonus versetzt wird, wird die endliche Ausbreitungsgeschwindigkeit des Elektrotonus verständlich.

2d) Ströme an den Augen. Schon Du Bois-Reymond hat darauf hingewiesen, daß sich von isolierten Augen elektrische Ströme ableiten lassen, aber erst spätere Untersuchungen haben sich mit den Strömen beschäftigt, welche bei Belichtung und Verdunklung der Augen auftreten.

Leiten wir von der Hornhaut zum hinteren Augenpol ab, so erhalten wir einen Strom, welcher im äußeren Kreis von der Hornhaut zum hinteren Augenpol fließt. An der isolierten Netzhaut des Wirbeltierauges läuft der Strom im äußeren Kreise von der Nervenfaserschicht zur Stäbchenschicht. Wir müssen daher schließen, daß dieser Strom auch die Richtung des Stromes des ganzen Auges bestimmt. Sämtliche Wirbeltieraugen zeigen einen gleichgerichteten Strom, bei den Tintenschnecken geht der Strom, wie Piper gezeigt hat, vom hinteren Augenpol zur Hornhaut. Das gleiche gilt für das Auge des Hummers (Dewar und M'Hendrik). Die histologische Untersuchung dieser Augen zeigt, daß die Stäbchenschicht gegen das Innere des Auges gelegen ist, während bei den Wirbeltieraugen die Nervenfaserschicht der Netzhaut nach innen liegt.

Als Sitz besonderer chemischer Umsetzung verhält sich die Stäbchenschicht negativ zur Nervenfaserschicht. Wird nun die Stäbchenschicht durch einen Lichtreiz in stärkere Erregung versetzt, so erhalten wir als Ausdruck dieser Erregung keine negative Schwankung des bestehenden Stromes, sondern eine Verstärkung, eine positive Schwankung. Figur 21 zeigt die Schwankungen des Demarkationsstromes eines Froschauges bei Belichtung und Verdunklung. Die obere Kurve stammt von einem Auge, das vor dem Versuch längere Zeit im Hellen gehalten worden war, die untere Kurve ist von einem dunkeladaptierten Auge aufgenommen. Der Belichtung folgt eine kurzdauernde Abschwächung des Demarkationsstromes, die von einer stärkeren Zunahme des Demarkationsstromes gefolgt ist, sie geht beim helladaptierten Auge wieder zurück, beim dunkeladaptierten Auge weist sie nach kurzdauernder Abnahme eine neuerliche Zunahme, die sekundäre Erhebung, auf. Der Verdunklung folgt beim helladaptierten Auge eine starke, beim Dunkelauge eine schwächere Verdunklungsschwankung, dann wird die anfängliche Stärke des Demarkationsstromes allmählich wieder erreicht. Der Verlauf dieser Belichtungs- und Verdunklungsschwankung scheint, wie die Untersuchungen von v. Brücke und Garten ergeben haben, in großen Zügen für alle Wirbeltieraugen der gleiche zu sein.

Die Belichtungsschwankungen lassen sich schon bei so kurzen Belichtungszeiten und so niedriger Lichtintensität nachweisen, daß die Empfindlichkeit unserer Netzhaut gegenüber Licht nahezu erreicht wird. Die Empfindlichkeit wird auch bei ausgeschnittenen Augen gesteigert, wenn sie vor der Belichtung längere Zeit im Dunkeln gehalten worden sind. Diese Steigerung ist bei den Augen der Tagvögel nur gering, während sie bei den Nachtvögeln das 100fache betragen kann. Die Latenzzeiten, die zwischen dem Moment der Belichtung und dem Beginn der elektrischen Schwankung vergehen, sind bei verschiedenen Tieren verschieden. Bei der Eule beträgt nach Garten die Latenzzeit 0,03 Sekunden, beim Frosch 0,09 Sekunden.

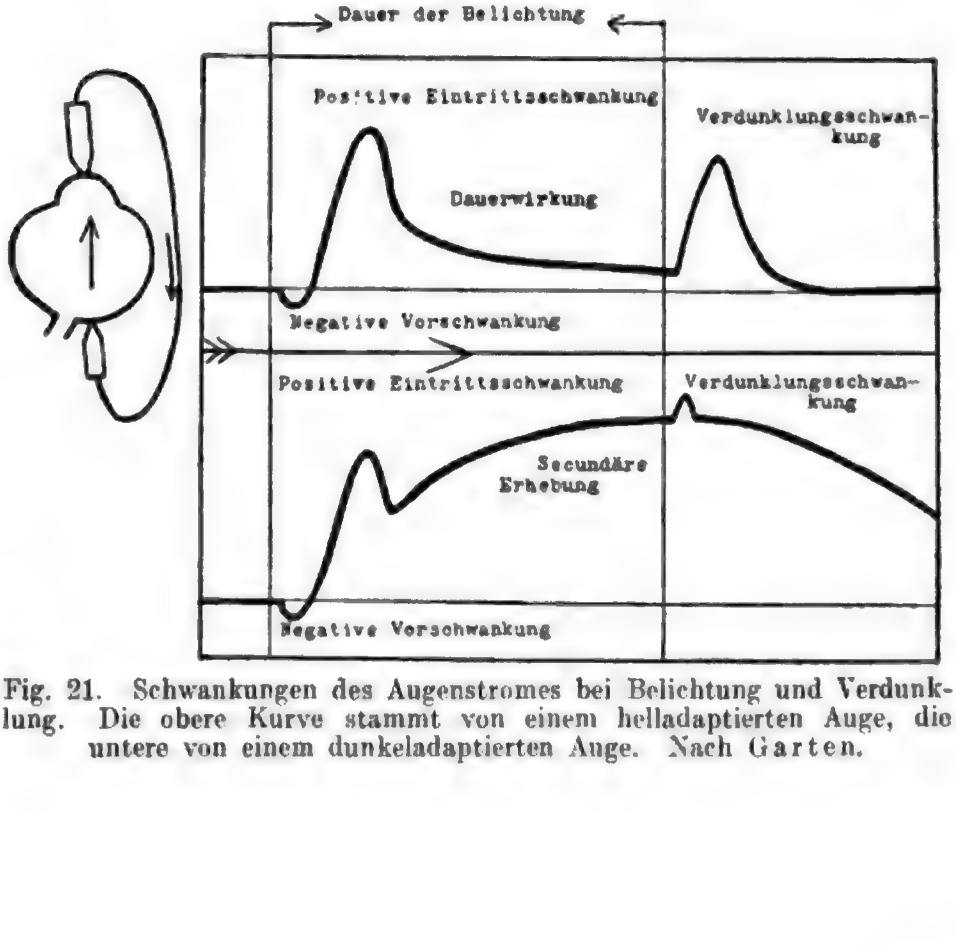


Fig. 21. Schwankungen des Augenstromes bei Belichtung und Verdunklung. Die obere Kurve stammt von einem helladaptierten Auge, die untere von einem dunkeladaptierten Auge. Nach Garten.

Bei intermittierender Lichtreizung vermag die Netzhaut bis zu einer gewissen Frequenz mit getrennten Aktionsströmen zu reagieren. Die Verschmelzungsfrequenz beträgt nach Piper für das Froschauge 15 Reize pro Sekunde, bei den Tagvögeln etwa 40 Reize. Daraus ist zu ersehen, daß die Verschmelzung intermittierender Erregung, welche innerhalb dieser Reizfrequenz auch beim menschlichen Sehen stattfindet, schon in der Netzhaut vor sich geht.

Bei Betrachtung des komplizierten Verlaufes des Netzhautstromes bei den Wirbeltieren kommt man von selbst zu der Anschauung, daß die verschiedenen Phasen mit ihrem Wendepunkt auf mehrere Teilströme zurückzuführen sind, welche in verschiedene Elemente der Netzhaut (Stäbchen, Zapfen, Ganglienzellen) zu lokalisieren sind. Für diese Annahme würde auch die Beobachtung Pipers sprechen, daß am Auge der Tintenschnecken, bei welchem von den Teilen der Retina nur die Stäbchen im Augapfel enthalten sind, bei Belichtung nur einfache Schwankungen auftreten.

2e) Drüsenströme. Schon Du Bois-Reymond hat die Ströme, welche sich von der Haut ableiten lassen, beobachtet. Es ist jedoch nicht die Haut das elektromotorisch Wirksame, sondern die in der Haut eingelagerten Drüsen (Schleim-, Schweißdrüsen usf.). Es haben sich auch von bloßgelegten Drüsen, z. B. den Speicheldrüsen, Ströme ableiten lassen. Ebenso konnte man Ströme von der drüsenreichen Magen- und Darmschleimhaut erhalten. Die tätigen Drüsenzellen verhalten sich entsprechend der Hermannschen Alterationstheorie negativ zu den übrigen Teilen der Drüsen oder der Haut. An der Haut hat der Strom eine einsteigende Richtung, er verläuft im äußeren Stromkreis von der Hautoberfläche zur Innenseite der Haut. Die Stärke des Stromes ist von dem Zustande und dem Grade der Tätigkeit des Drüsengewebes abhängig. Wird die Haut stark geschädigt, wird sie narkotisiert oder erstickt, so wird der Strom schwächer oder er verschwindet. Wird die Sekretionstätigkeit der Drüsen gesteigert, so nimmt der Strom an Stärke zu. — Bei Kaltblütern wurden Hautströme von 0,05 Volt Spannung gemessen.

Es ist möglich, durch verschiedene Beeinflussungen die Richtung des Demarkationsstromes umzukehren. Man kann z. B. den einsteigenden Strom einer Froschhaut in einen aussteigenden verwandeln, wenn man die Haut längere Zeit in einer physiologischen Kochsalzlösung von 0° einlegt.

Bei direkter Reizung der Drüsen oder bei Reizung ihrer Nerven kann man in der Regel eine Verstärkung, aber auch eine Abschwächung des Demarkationsstromes erhalten. Dies hängt von dem Tätigkeitsgrad der Drüsen ab. Sind sie nur wenig erregt, dann ist der einsteigende Strom schwach und bei Reizung erfolgt eine Zunahme, bei starkem einsteigendem Strom erfolgt bei Reizung häufig eine Abnahme desselben.

Die Richtung der Stromschwankung hängt ferner von der Stärke der Reizung ab. Bei schwachen Reizen kann man eine Schwächung, bei starken Reizen eine Zunahme, bei mittleren Reizstärken ein rhythmisches Schwanken des Demarkationsstromes beobachten. Gifte, wie das Pilocarpin, erregen die peripheren Enden der Drüsennerven und sind mit einer Verstärkung des Demarkationsstromes verbunden. Atropin lähmt die Drüsennerven, die direkte Erregbarkeit der Drüsen bleibt jedoch erhalten, der Demarkationsstrom nimmt ab.

3. Elektrizitätsproduktion bei Pflanzen

3a) Stengel. Blätter. Blüten. Drüsen. Keimlinge. Die Ströme, welche sich am Pflanzenkörper nachweisen lassen, wurden zuerst von Hermann und Burdon-Sandersen in eingehender Weise untersucht. Unsere Kenntnisse von der Elektrizitätsproduktion bei Pflanzen haben insbesondere in der Elektrophysiologie von Biedermann eine eingehende Darstellung erfahren.

Wird ein Pflanzenstengel durchschnitten, so verhält sich der Querschnitt zu den unverletzten Stellen negativ, doch nimmt der Demarkationsstrom aus demselben Grunde wie bei den glatten Muskeln und den elektrischen Organen rasch ab. An Pilzstielen wurden von Hermann Ströme beobachtet, welche eine elektromotorische Kraft von 0,05 eines Daniellelementes erreichten. Man kann auch von unverletzten Pflanzen Ströme ableiten, wenn zwei verschiedene Punkte der Pflanze mit dem strommessenden Instrument verbunden werden. Bei Ableitung von der Blattfläche und einer Blattrippe verhält sich erstere negativ zur letzteren. Bei Ableitung von der Ober- zur Unterseite kann der Strom einmal in einer, das anderemal in entgegengesetzter Richtung fließen. Die Richtung hängt vom Zustande des Blattes ab. Bei Belichtung des Blattes wird die Blattfläche stärker negativ im Verhältnis zur Blattrippe oder dem Stengel.

Als stark elektromotorisch wirksam erweisen sich alle Pflanzenteile, in welchen starke chemische Umsetzungen stattfinden, die Pflanzendrüsen, die Blüten, die wachsenden Teile, die Keimlinge. Figur 22 zeigt den Verlauf der Ströme bei Ableitung von verschiedenen Stellen des Keimlingskörpers.

3b) Elektrizitätsproduktion bei Reizbewegungen. Von Aktionsströmen können wir eigentlich nur bei Pflanzen

Digitized by Google

sprechen, welche Reizung mit Bewegungen beantworten. Die Aktionsströme, welche die Reizbewegung von Dionaea muscipola und Mimosa pudica begleiten, oder besser gesagt, den Reizbewegungen vorausgehen, sind von Burdon-Sanderson eingehend untersucht worden.

Das Dionaeablatt kann längst der Mittelrippe zusammenklappen. Diese Bewegung wird durch mechanische Reizung der Sinneshaare ausgelöst, welche an der Innenfläche des Blattes stehen. Der Mechanismus kann zum Fangen von Insekten dienen. Reizen dieselben ein Sinneshaar, so pflanzt sich die Erregung durch reizleitende Parenchymzellen zu den Bewegungszellen fort. Dieselben befinden sich an der Oberseite der Mittelrippe. Ihrem Druck wirken Zellen an der Unterseite der Mittelrippe entgegen. Bei Reizung nimmt der Druck in den Bewegungszellen ab, der Druck der Gegenzellen überwiegt, das Blatt schließt sich. Ein ähnlicher Mechanismus befindet sich auch an den Mimosenblättern.

Die Richtung und Stärke der Aktionsströme hängt vom Zustande des Blattes und der Art der Ableitung ab. Es können auch doppelsinnige Schwankungen vorkommen.

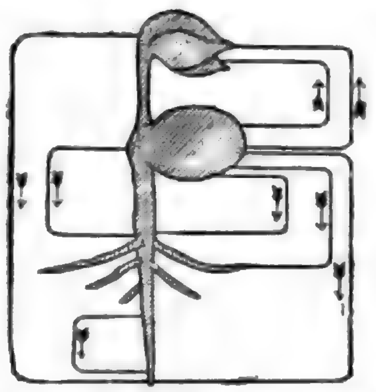


Fig. 22. Stromverlauf an einem Keimling. Nach Müller-Hettlingen.

Der Aktionsstrom tritt früher als die Reizbewegung ein. In einzelnen Fällen konnten Aktionsströme ohne Reizbewegungen beobachtet werden. Aktionsströme treten auch auf, wenn das Blatt durch Fixierung verhindert ist, eine Reizbewegung auszuführen.

4. Die Theorie der Elektrizitätsproduktion. 4a) Reibungselektrizität. Unter den an lebenden Körpern nachweisbaren elektrischen Erscheinungen sind zunächst jene zu nennen, welche statischer Natur sind. Beim Reiben der Haut, Nägel, Haare oder Federn können elektrische Spannungen von 1000 und mehr Volt entstehen. Sie haben vielfach zu erregten Diskussionen Anlaß gegeben. Vergleiche z. B. die Diskussion über die Bedeutung der Fingerspitze als Elektrizitätsquelle.

4b) Galvanische Elektrizität. *a*) Der Demarkationsstrom und die Aktionsströme. Für das Verständnis der Erscheinungen galvanischer Elektrizität an Tier- und Pflanzenzellen sind die Ausführungen Hermanns von grundlegender Bedeutung geworden. Dadurch, daß er nachwies, daß jede erregte oder geschädigte Stelle sich negativ gegenüber den weniger erregten oder nicht geschädigten verhält, kam in das Gewirr einander widersprechender Analysen Ordnung.

Es könnte den Anschein haben, daß zwischen dem Demarkationsstrom eines Nerven und einer Drüse ein Unterschied besteht. Beim Nerven erhalten wir einen Demarkationsstrom erst, wenn wir ihn an einer Stelle verletzen und von dieser zu einer unverletzten Stelle ableiten. Die Erregung im Nerven äußert sich in einer negativen Schwankung des Demarkationsstromes. Der Demarkationsstrom einer Drüse läßt sich nachweisen, wenn wir das tätige Drüsengewebe und die Ausführungsgänge der Drüse mit dem strommessenden Instrument verbinden. Eine Reizung der Drüse hat eine Verstärkung des Demarkationsstromes zur Folge. So wie der Nerv verhielten sich der quergestreifte Muskel, der Herzmuskel, die elektrischen Organe, viele glatte Muskeln, wie die Drüsenzelle verhalten sich die tonisch kontrahierten glatten Muskeln, die Augen und die Pflanzen, also jene Formen lebendiger Substanz, welche schon durch Reize, die auf Nerven, Muskeln und elektrische Organe keine wahrnehmbare Wirkung haben, wesentlich erregt werden. Wir können demnach verschiedene Formen von Aktionsströmen unterscheiden, welche bei Reizung eines Organes auftreten.

1. Eine Abschwächung des Demarkationsstromes.
2. Verstärkung des Demarkationsstromes.
3. Doppelsinnige Schwankungen des Demarkationsstromes, erst Abschwächung und dann Verstärkung oder erst Verstärkung und dann Abschwächung.
4. Nachwirkungen, welche in einer die Reizung überdauernden Verstärkung oder Abschwächung des Demarkationsstromes zum Ausdruck kommen.
5. Mehrsinnige Schwankungen des Demarkationsstromes.

Die unter 3 angeführten doppelsinnigen Schwankungen werden verständlich, wenn wir uns das Verhalten eines glatten Muskels bei Reizung seines Nerven veranschaulichen. Ist er tonisch kontrahiert, so erhalten wir bei schwacher Nervenreizung eine Anfangskontraktion, die noch während der Reizung von einer weitgehenden Erschlaffung des Muskels gefolgt ist. Es ist dies eine Hemmung, welcher eine kurzdauernde Erregung vorausgeht. Der elektrische Ausdruck dieses

Digitized by Google

Verhaltens ist eine doppelsinnige Schwankung. Die Richtung dieser Schwankung ist davon abhängig, ob wir vom Längsschnitt zum Querschnitt des Muskels oder vom Längsschnitt zu einem indifferenten Punkt ableiten. Im ersteren Fall werden wir zuerst eine Abnahme, dann eine Zunahme des Demarkationsstromes, im letzteren Fall zuerst eine Zunahme, dann eine Abnahme des Demarkationsstromes eintreten sehen. Es ist klar, daß bei fehlender Berücksichtigung dieser keineswegs unübersichtlichen Verhältnisse ein Gewirr von Angaben entstehen muß, durch das durchzukommen unmöglich ist. Aehnlich verhält es sich mit den Nachwirkungen der Reizungen. Wenn wir bei Reizung eines tonisch kontrahierten glatten Muskels eine Zunahme der Kontraktion erhalten, welche die Reizung überdauert, so werden wir bei Ableitung vom Längsschnitt zum Querschnitt Abnahme des Demarkationsstromes bekommen, bei Ableitung vom Längsschnitt zu einem indifferenten Punkt eine Zunahme des Demarkationsstromes. Es kommt in erster Linie darauf an, daß Klarheit herrscht über die Entstehungsbedingungen des Demarkationsstromes. Die vielfach übliche Bezeichnung positive und negative Schwankung ist häufig nur geeignet, falsche Vorstellungen zu erwecken.

Die mehrsinnigen Schwankungen, wie sie z. B. bei Belichtung des Auges auftreten, kommen wohl durch Beteiligung mehrerer Netzhautelemente bei der Entstehung der Schwankungen zustande. Wir können ganz ähnliche mehrsinnige Schwankungen bei reflektorischer Erregung eines Skelettmuskels beobachten; bei diesen Schwankungen kann kein Zweifel sein, daß die Wendepunkte in den Kurven durch Erregung neuer Reflexwege im Rückenmark zustande kommen. Auch für das Verständnis der komplizierten elektrischen Schwankungen im Elektrotonus bieten die Hermannschen Grundanschauungen den Schlüssel.

β) Theorie der Produktion galvanischer Elektritziät. Die Elektrizitätsproduktion einer lebendigen Substanz steht in naher Beziehung zur Wirkung elektrischer Reize. Bei elektrischer Reizung kennen wir die erste Phase der Reizwirkung und eine der letzten Phasen, den elektrischen Ausdruck des Erregungsvorganges. Nach Nernst beruht die erste Phase der Reizwirkung auf einer Polarisation an einer semipermeablen Membran. Die Bedingungen für das Bestehen einer solchen und für das Auftreten von Ionenverschiebungen an derselben sind an jeder Form lebendiger Substanz vorhanden. Auch die Elektrizitätsproduktion als letzte Phase des Erregungsvorganges kann auf nichts anderem beruhen, als auf einer Ionenverschiebung, denn nur bei solchen kann ein galvanischer Strom auftreten. Ueber die Zwischenglieder des Erregungsvorganges, die zwischen primärer Reizwirkung und dem Auftreten des Aktionsstromes liegen, insbesondere über die Beteiligung der Ionenverschiebung am Stoff- und Energiewechsel der lebendigen Substanz läßt sich noch nichts Bestimmtes aussagen. Wir wissen nur, daß die Lebensvorgänge in engster Abhängigkeit von der Anwesenheit der Elektrolyten stehen, daß selbst für die Wirkung der Fermente die Anwesenheit von Salzen unbedingt notwendig ist.

Literatur. ***E. Du Bois-Reymond,*** *Untersuchungen über tierische Elektrizität. Berlin 1848.* — ***W. Biedermann,*** *Elektrophysiologie. Jena 1895.* — ***A. Waller,*** *Tierische Elektrizität. Leipzig 1899.* — ***S. Garten,*** *Die Produktion von Elektrizität. Im Handbuch der vergleichenden Physiologie. Jena 1911.* — ***E. Pflüger,*** *Elektrotonus. Berlin 1859.* — ***L. Hermann,*** *Handbuch der Physiologie I. 1879.* — ***E. Hering,*** *Zur Theorie der Vorgänge in der lebendigen Substanz. Lotos. Bd. 9. 1888.* — ***M. Cremer,*** *Die allgemeine Physiologie der Nerven. Nagels Handbuch der Physiologie. 1909.* — ***W. Einthoven,*** *Weiteres über das Elektrokardiogramm. Pflügers Archiv. Bd. 122. 1908.* — ***F. W. Fröhlich,*** *Ueber die rhythmische Natur der Lebensvorgänge. Zeitschrift für allgemeine Physiologie. Bd. 13. 1911.* — ***W. Nernst,*** *Zur Theorie des elektrischen Reizes. Pflügers Archiv. Bd. 122. 1908.* — ***H. Piper,*** *Verlauf und Theorie des Netzhautstromes. Physiologisches Zentralblatt. Bd. 24. 1911.*

F. W. Fröhlich.

Elektrochemie.

1. Galvani. 2. Volta und die Kontakttheorie. Leiter erster und zweiter Klasse. Spannungsreihe. Spannungsgesetz. 4. Voltasche Säule. Hintereinander- und Nebeneinanderschaltung. 5. Ritter. Davy. 6. Grotthuß. 7. Simon. Gewinnung von Natrium. 8. Elektrochemischer Dualismus. 9. Ohm und sein Gesetz. Fechner. Uebergangswiderstand. Polarisation. 10. Faraday und sein Gesetz. 11. Ionen. Kationen. Anionen. Elektrolyte. Elektrolyse. Elektroden. Kathode. Anode. Jacoby. Galvanoplastik. Elektroplattierung oder Galvanostegie. Clausius und seine Leitungstheorie. 12. Hittorf. Wanderung der Ionen. Kohlrausch. Leitfähigkeit der Elektrolyte. van't Hoff. Osmotische Theorie der Lösungen. Arrhenius. Elektrolytische Dissoziationstheorie. 13. Dissoziationsgrad. 14. Chemische Theorie der galvanischen Kette. 15. Ostwald. Massenwirkungsgesetz. Nernst und seine osmotische Theorie des galvanischen Elementes. Helmholtz. Elektrolytische Lösungstension. 16. Konzentrationskette. Flüssigkeitskette. Klemmspannung. Innerer Widerstand. Aeußerer Widerstand. Badspannung. Elektrische Grenzkräfte. 17. Einzelspannung. Normalelektrode. Elektrolytische Potentiale.

Digitized by Google

Spannungsreihe. 18. EMK und chemisches Gleichgewicht. Vorbedingung für die Entstehung eines elektrischen Stromes. 19. Oxydations- und Reduktionserscheinungen. 20. Polarisation. Polarisationsstrom. Zersetzungswert. Le Blanc. 21. Ueberspannung. 22. Elektrolyse gemischter Lösungen. Elektroanalyse. 23. Stromdichte. Primäre und sekundäre Elektrolyse. Elektrosynthese. 24. Zwitterelemente. Elektrische Zerstäubung. 25. Passivität. 26. Keir. 27. Wetzlar. Fechner. 28. Schönbein. Faraday. Oxydtheorie. Müller und Königsberger. Wertigkeitstheorie. Reaktionsgeschwindigkeitstheorie. Katalytische Einflüsse. Förster. 29. Verschiebung der Wertigkeit. 30. Ventilzellen. 31. Elektrolyse ohne Elektroden. Elektrothermische Prozesse. Elektrische Oefen. 32. Namen der bedeutendsten Forscher.

1. Galvani. Unter Elektrochemie versteht man die Lehre von dem Zusammenhang chemischer und elektrischer Erscheinungen. In der Mitte des 18. Jahrhunderts wurde bereits bekannt, daß „Elektrizität" auch chemische Wirkungen hervorbringen könne; aus gewissen Metalloxyden, zwischen denen man den durch eine Elektrisiermaschine erzeugten elektrischen Funken überspringen ließ, konnten die entsprechenden Metalle abgeschieden werden. Auch wußte man, daß Luft beim Durchschlagen von Funken sich braun färbte und bei Berührung mit Wasser ihr Volum verkleinerte. Ein eingehenderes Studium elektrochemischer Vorgänge war erst möglich, nachdem eine neue Elektrizitätsquelle entdeckt worden war, die größere Elektrizitätsmengen als die Elektrisiermaschine in der Zeiteinheit hergab. Eine solche lieferte die Entdeckung Galvanis im Jahre 1791. Dieser hatte, nachdem er an Froschpräparaten durch Induktion hervorgebrachte Zuckungen beobachtet hatte, durch weiteres Experimentieren gefunden, daß unabhängig von Elektrizitätsströmungen in der Umgebung stets ein Zucken des Präparates eintrat, wenn er dieses, das einen Draht im Rückenmark trug, auf eine eiserne Scheibe legte und den Draht mit dieser in Berührung brachte. Er glaubte allerdings noch, daß der tierische Organismus als solcher die Quelle der elektrischen Energie sei und verglich ihn mit einer Leidener Flasche: Muskel und Nerv stellten die beiden Belegungen vor, der metallene Schließungsbogen bewerkstelligte die Entladung.

2. Volta und die Kontakttheorie. Erst Volta stellte die Verhältnisse richtig dar. Er hatte nämlich gefunden, daß nur dann starke Zuckungen auftraten, wenn der Schließungsbogen von zwei oder mehreren Metallen gebildet war, während bei der Leidener Flasche die Art des metallenen Schließungsbogens keine Rolle spielt, und kam schließlich zur Erkenntnis, daß stets ein elektrischer Strom entstand, wenn zwei Metalle und eine Flüssigkeit zu einem Stromkreis vereinigt waren. Die Annahme einer „tierischen" Elektrizität wurde fallen gelassen; das Froschpräparat stellte keine Elektrizitätsquelle, sondern lediglich ein empfindliches Elektroskop dar.

Die Frage nach dem Sitz der elektrischen Erregung beantwortete Volta dahin, daß er an der Berührungsstelle der beiden Metalle zu suchen sei, und schuf damit eine Anschauungsweise, die sogenannte Kontakttheorie, die viele Jahrzehnte hindurch, wenn auch nicht unangefochten, herrschend blieb.

3. Leiter erster und zweiter Klasse. Spannungsreihe. Spannungsgesetz. Volta bezeichnete die metallenen Leiter, ferner Kohle und einige natürliche Verbindungen als Leiter erster Klasse, die Flüssigkeiten als Leiter zweiter Klasse. Wir haben diesen Unterschied im wesentlichen beibehalten und definieren Leiter erster Klasse als solche, die den elektrischen Strom ohne nachweisbare Bewegung ponderabler Materie leiten, während bei den Leitern zweiter Klasse die Leitung stets mit einer solchen Bewegung verknüpft ist (vgl. auch den Artikel „Elektrizitätsleitung"). Für erstere stellte er die Spannungsreihe auf, indem er sie derartig anordnete, daß bei Verbindung zweier Glieder miteinander und einem Leiter zweiter Klasse zu einem Stromkreis der Strom stets von dem in der Reihe höher stehenden Gliede durch die Flüssigkeit zu dem in der Reihe niedriger stehenden Gliede ging. Der Strom war um so stärker, je weiter die Glieder voneinander entfernt waren. Wenige Jahre später gab derselbe Forscher das Spannungsgesetz (1801), wonach zwischen zwei Metallen, gleichgültig, ob sie sich direkt berühren oder nicht, stets die gleiche Spannung besteht. Es folgt daraus die Unmöglichkeit, einen elektrischen Strom lediglich durch die gegenseitige Berührung von Metallen hervorzubringen, weil die Summe sämtlicher Spannungen in einem solchen Stromkreise gleich Null ist. Für Leiter zweiter Klasse galt nach Volta das Spannungsgesetz nicht, und an der Berührungsstelle zweier Leiter von verschiedener Klasse sollte nahezu die Spannung Null herrschen. Gemäß dieser Anschauung floß z. B. bei dem galvanischen Element

Zink — Silber
| |
Leitende Flüssigkeit

der elektrische Strom mit nahezu der zwischen Zink und Silber bestehenden Spannung durch den Stromkreis.

4. Voltasche Säule. Hintereinander- und Nebeneinanderschaltung. Volta verdanken wir auch die Konstruktion der „Säule", die nichts weiter als eine Reihe hintereinander-

ed by Google

geschalteter galvanischer Elemente (s. den Artikel „Galvanische Ketten") darstellt. In der ursprünglichen Anordnung waren abwechselnd eine Silberplatte, eine mit Salzlösung getränkte Scheibe Pappe, eine Zinkplatte, eine Silberplatte usf. aufeinander gelegt. Dadurch wurde eine Spannungserhöhung (allerdings auch eine Widerstandserhöhung) erzielt, die proportional der Anzahl der hintereinandergeschalteten Elemente war. Durch Nebeneinanderschalten von zwei oder mehreren Elementen oder, was auf das gleiche herauskommt, durch eine Vergrößerung des Querschnitts der Metall- und Flüssigkeitsschichten in einem einzigen Element, kann, wie schon Volta wußte, keine Spannungserhöhung, wohl aber eine Widerstandsverminderung erzielt werden.

5. Ritter und Davy. Bald nach Aufstellung der Spannungsreihe sprach Ritter (1798) den wichtigen Satz aus, daß die Metalle in der Ordnung in der Spannungsreihe aufeinander folgten, in der sie sich aus ihren Salzlösungen zu verdrängen imstande wären. Wir können in ihm den Anfang der wissenschaftlichen Elektrochemie erblicken.

Volta selbst hat, obwohl er viel mit seiner Säule experimentierte, nichts von ihrer Fähigkeit erwähnt, das Wasser zu zersetzen; diese Entdeckung verkündeten Ritter und Davy, indem sie angaben, daß an dem mit dem negativen Pol der Säule verbundenen Draht Wasserstoff, an dem anderen Sauerstoff auftrat, und daß die Wasserstoff entwickelnde Seite der Flüssigkeit alkalisch, die andere sauer wurde. Nur in dem Falle blieb letztere neutral, daß an Stelle der Sauerstoffentwickelung Metallauflösung trat.

6. Grotthuß. Die Tatsache, daß bei der elektrolytischen Wasserzersetzung Wasserstoff und Sauerstoff räumlich getrennt voneinander auftraten, machte den Forschern viel Kopfzerbrechen; man wußte bereits, daß Wasser aus Wasserstoff und Sauerstoff besteht, und es dünkte plausibler, daß beide räumlich beieinander erschienen. Eine für die nächsten Jahrzehnte befriedigende Erklärung gab von Grotthuß (1805). Nach ihm bestanden die Wassermolekeln aus einem positiv geladenen Wasserstoffatom und einem negativ geladenen Sauerstoffatom, wenn sie sich zwischen den beiden unangreifbaren Polen der Säule befanden, und ordneten sich derart, daß ihre positive Seite dem negativen Pol und die negative dem positiven Pol zugekehrt wurde. Bei genügender Ladung der Pole konnte das am negativen Pol befindliche Wasserstoffatom aus dem Molekelverbande herausgerissen werden, seine Ladung mit der entsprechenden negativen des Drahtendes neutralisieren und als unelektrischer gasförmiger Wasserstoff entweichen. Das gleiche geschah mit dem Sauerstoffatom am positiven Pol. Das am negativen Pol übrig gebliebene Wasserstoffatom kam nun in eine begünstigte Lage zu dem Sauerstoffatom einer Nachbarmolekel und verband sich mit diesem. Dadurch wurde ein anderes Wasserstoffatom frei, das nun mit dem Sauerstoffatom einer anderen Wassermolekel in Verbindung trat usf. Durch solche wiederholte Zersetzung und Bildung, die sich zwischen den beiden Polen sowohl vom negativen wie auch mutandis mutatis vom positiven Pol aus abspielte, fand das oben übrig gebliebene Wasserstoff- und Sauerstoffatom wieder Unterkunft im Molekelverbande. Alle Molekeln führten sodann eine Drehung aus, damit wiederum ihre positive Seite dem negativen Pol und umgekehrt zugewandt wurde, und die Elektrolyse konnte weitergehen.

7. Simon. Gewinnung von Natrium. Bei der Elektrolyse von reinem Wasser trat saure und alkalische Reaktion nicht auf, wie Simon und Davy nachwiesen; für ihr Erscheinen war ein Salzgehalt des Wassers notwendig. Der zuletzt genannte Forscher zeigte auch, daß der elektrische Strom bei der Einwirkung auf geschmolzenes Aetzalkali an der Kathode Alkalimetall abschied, und legte damit den Grund für die heute fabrikmäßig betriebene Gewinnung von Natrium.

8. Elektrochemischer Dualismus. Die Beobachtung, daß bei allen elektrolytischen Vorgängen und auch in der Säule selbst ein polarer Gegensatz bestand, veranlaßten Davy und Berzelius zur Aufstellung ihrer Theorie des elektrochemischen Dualismus, wonach jede Verbindung aus einem vorwiegend positiv und einem vorwiegend negativ sich verhaltenden Bestandteil zusammengesetzt sein sollte. Die Theorie leistete in systematischer Hinsicht bedeutendes, wenn sie sich auch bald, besonders als die organische Chemie in den Vordergrund zu treten begann, als zu einseitig erwies.

9. Ohm und sein Gesetz. Fechner. Uebergangswiderstand. Polarisation. Für die weitere Entwickelung der Elektrochemie waren indirekt die Arbeiten von Ohm wichtig, der das nach ihm benannte Gesetz (1825) auffand, nach dem die Stromstärke proportional der Spannung und umgekehrt proportional dem Widerstand ist. Denn erst die Aufstellung dieses Gesetzes ermöglichte die späteren Forschungen auf dem Gebiet des Widerstandes der Lösungen bezw. des reziproken Wertes: der Leitfähigkeit (s. den Artikel „Elektrizitätsleitung).

Bemerkt sei an dieser Stelle, daß kurze

Digitized by Google

Zeit darauf von Fechner noch ein weiterer Widerstandsbegriff, der des Uebergangswiderstandes eingeführt wurde, der an den Uebergängen von Leitern erster und zweiter Klasse vorhanden sein sollte. Dieser Uebergangswiderstand hat wiederholt eine Rolle gespielt, ist aber jetzt aufgegeben. Er kann entweder durch die Bildung schlecht leitender Ueberzüge bezw. durch die Entstehung isolierender Gasschichten oder durch Aenderung der an jenen Uebergangsstellen auftretenden Potentialsprünge vorgetäuscht werden. Letztere mit dem Namen der Polarisation bezeichnete Erscheinung war schon von Ritter beobachtet und ist seitdem vielfach untersucht worden; wir kommen darauf noch zurück.

10. Faraday und sein Gesetz. In der ersten Hälfte der dreißiger Jahre veröffentlichte Faraday seine wichtigsten elektrochemischen Untersuchungen. Aus ihnen ergab sich einmal, daß zwischen der durch einen Stromkreis gesandten Elektrizitätsmenge und der durch sie hervorgerufenen chemischen und magnetischen Wirkung Proportionalität bestand; und ferner, daß die durch gleiche Elektrizitätsmengen an den Polen ausgeschiedenen Stoffmengen, unabhängig von den äußeren Bedingungen, im Verhältnis ihrer chemischen Aequivalentgewichte zueinander stehen. Den Inhalt dieser Sätze bezeichnet man gewöhnlich als das Faradaysche Gesetz. Es kann natürlich nur solange gültig sein, als es sich um Leiter zweiter Klasse handelt. Umgekehrt kann man seine Gültigkeit oder Ungültigkeit als Kriterium betrachten, ob man es mit Leitern zweiter oder erster Klasse zu tun hat.

11. Ionen. Kationen. Anionen. Elektrolyte. Elektrolyse. Elektroden. Kathode. Anode. Jacoby. Galvanoplastik. Elektroplattierung oder Galvanostegie. Clausius und seine Leitungstheorie. Von Faraday stammt auch unsere heute gebräuchliche Nomenklatur. Die sich unter dem Einfluß des Stromes zu den Polen bewegenden ponderablen Teilchen nannte er Ionen (vgl. den Artikel „Ionen"), und zwar die in der Richtung der positiven Elektrizität wandernden Kationen, die anderen Anionen. Die Leiter zweiter Klasse nannte er Elektrolyte, den Vorgang selbst Elektrolyse. Die Berührungsstellen von Leitern erster und zweiter Klasse, an denen der Strom aus- und eintrat, hieß er Elektroden. Der Ort, zu dem die Kationen wanderten, bekam den Namen Kathode, der, zu dem die Anionen gingen, den Namen Anode.

Die Beobachtung, daß das an der Kathode im Daniellelement (vgl. den Artikel „Galvanische Ketten") ausgeschiedene Kupfer sich allen Unebenheiten anpaßte, führte M. Jacoby Ende der dreißiger Jahre zur Entdeckung der Galvanoplastik, nachdem vereinzelte Beobachtungen in dieser Hinsicht schon am Anfang des Jahrhunderts gemacht worden waren. Dieser Zweig der Elektrochemie hat sich bekanntlich zu einer weit verbreiteten Technik ausgewachsen, in der leitende oder leitend gemachte Körper mit den verschiedensten Metallen oder auch mit Legierungen überzogen werden. Man hat hier zwei Abteilungen zu unterscheiden: die eigentliche Galvanoplastik, bei der die Metallniederschläge von ihrer Unterlage getrennt eine Nachbildung derselben vorstellen, und die Elektroplattierung oder Galvanostegie, bei der es sich um die Bildung eines schützenden bezw. das Objekt veredelnden Ueberzuges handelt, der unter Umständen recht dünn ist und stets mit der Unterlage innig verbunden sein soll. Spezielles darüber findet man bei den einzelnen Metallen.

In der zweiten Hälfte des vorigen Jahrhunderts begann man ernstlich die Unzulänglichkeit der Grotthußschen Theorie zu empfinden. Nach ihr durfte eine Zersetzung der Molekeln und damit eine Leitung erst eintreten, wenn die Ladung der Elektroden eine solche Stärke erreicht hatte, daß die entgegengesetzt geladenen Teilchen des Elektrolyten aus dem Molekelverbande getrennt werden konnten. Tatsächlich fand man aber, daß unter geeigneten Versuchsbedingungen, nämlich bei Vermeidung der Polarisation, wie z. B. bei der Anordnung Silber/Silbernitratlösung/Silber, bereits bei Anlegung einer minimalen Spannung Leitung eintrat, und das Ohmsche Gesetz für das reine Phänomen der elektrolytischen Leitung von der Spannung Null an gültig war. Daraus ergab sich eigentlich der Schluß, daß die Ionen unverbunden in der Flüssigkeit vorhanden waren. Clausius scheute sich aber, ihn auszusprechen und stellte folgende Leitungstheorie auf, die sich der Annahmen der kinetischen Gastheorie bediente. Die positiven und negativen Teilchen einer Molekel befänden sich in einem Schwingungszustande; würden die Schwingungen sehr lebhaft, so käme mitunter etwa das positive Teilchen der einen Molekel zu dem negativen einer anderen in eine begünstigtere Lage und diese beiden blieben dann zusammen. Die dadurch frei gewordenen Teilchen würden wieder bald zu anderen entgegengesetzt geladenen in besonders begünstigte Lage kommen usf., so daß auf diese Weise ein Austausch zwischen den positiven und negativen Teilchen der verschiedenen Molekeln stattfände. Wirkte nun auf die Flüssigkeitsteilchen eine elektrische Kraft, so würde der Austausch und das Hin- und Herschwingen der geladenen

Digitized by Google

Teilchen nicht mehr regellos wie bisher vor sich gehen, sondern solche Zerlegungen, bei denen die Teilmolekeln in ihren Bewegungen zugleich der Richtung der elektrischen Kraft folgten, würden erleichtert und daher häufiger stattfinden. Insgesamt resultierte daraus eine überschüssige Bewegung der geladenen Teilchen zu den entgegengesetzt geladenen Elektroden und diese stellte eben den galvanischen Strom in der Flüssigkeit vor.

12. Hittorf. Wanderung der Ionen. Kohlrausch. Leitfähigkeit der Elektrolyte. van't Hoff. Osmotische Theorie der Lösungen. Arrhenius. Elektrolytische Dissoziationstheorie. Zur gleichen Zeit begann Hittorf seine Arbeiten über die Wanderung der Ionen (vgl. den Artikel „Ionen") und 1 bis 2 Jahrzehnte später Fr. Kohlrausch seine Untersuchungen über die Leitfähigkeit der Elektrolyte (vgl. den Artikel „Elektrolytische Leitfähigkeit"). Nachdem dann J. H. van't Hoff noch 1887 seine osmotische Theorie der Lösungen (vgl. die Artikel „Osmotische Theorie" und „Lösungen") aufgestellt hatte, die die Bestimmung des Molekulargewichtes der gelösten Stoffe und damit einen Einblick in die Konstitution gestattete, konnte S. Arrhenius in demselben Jahr auf dieser Grundlage seine Theorie der freien Ionen, die sogenannte elektrolytische Dissoziationstheorie aufstellen. Er wies in seiner Arbeit „Ueber die Dissoziation der in Wasser gelösten Stoffe", Z. f. physik. Chem. 1, 631, 1887 darauf hin, daß nur diejenigen Lösungen, welche einen zu großen osmotischen Druck zeigten, den galvanischen Strom leiteten und zwar um so besser, je größer die Abweichungen vom normalen, d. h. dem nach dem Formelgewicht zu erwartenden Druck waren. Die anderen Lösungen leiteten so gut wie gar nicht. Zur Erklärung nahm er an, daß die die Leitung bewirkenden gelösten Stoffe zum Teil gespalten seien, und nur die Spaltungsprodukte die Leitung vollführten; er schrieb ihnen elektrische Ladungen zu und nannte sie Ionen. Auch verfehlte er nicht darauf hinzuweisen, wie durchsichtig eine Reihe anderer physikalischer und chemischer Tatsachen im Lichte der Annahme freier Ionen würde (vgl. die Artikel „Chemische Analyse" und „Dissoziation. Elektrolytische Dissoziation").

13. Dissoziationsgrad. In einer Lösung von Chlornatrium befinden sich nach der elektrolytischen Dissoziationstheorie neben undissoziierten Molekeln NaCl (eventuell auch Polymolekeln) die Ionen Na^+ und Cl^-, wenn wir von Komplexionen absehen. Unter dem Dissoziationsgrad versteht man die Anzahl der gespaltenen Molekeln dividiert durch die gesamte bei fehlender Dissoziation vorhandene Molekelzahl. Diesen Dissoziationsgrad γ kann man einmal aus Messungen des osmotischen Druckes berechnen, wenn man die Anzahl Ionen kennt, in die eine Molekel sich spaltet, und den „normalen", d. h. den bei fehlender Dissoziation auftretenden Druck, was beides der Fall ist. Sodann kann γ aus Leitfähigkeitsmessungen (vgl. den Artikel „Elektrolytische Leitfähigkeit") berechnet werden. Die nach beiden Methoden erhaltenen Werte stimmten genügend überein, was natürlich wesentlich zur Stütze der Theorie beitrug.

14. Chemische Theorie der galvanischen Kette. Inzwischen war die Kontakttheorie Voltas von vielen Forschern verlassen worden und an ihre Stelle die chemische Theorie der galvanischen Kette getreten. Die chemischen Reaktionen, die zwischen Metall und Flüssigkeit eintreten und die früher als nebensächlich angesehen wurden, mußten nach dem Gesetz der Erhaltung der Energie als Ursache für die Erzeugung des Stromes betrachtet werden, und als hauptsächlichsten Sitz der Spannung mußte man sich entschließen, die Berührungsstellen von Metall und Flüssigkeit anzusehen. Ob allerdings die Spannung an der Berührungsstelle zweier Metalle gleich Null ist, erscheint auch heutzutage noch fraglich, wahrscheinlich dürfte sie einen kleinen Wert besitzen.

In betreff der Frage, inwieweit die chemische Energie der im Element sich abspielenden Vorgänge quantitativ in elektrische Energie übergeht, sei auf den Artikel „Galvanische Ketten" verwiesen.

15. Ostwald. Massenwirkungsgesetz. Nernst und seine osmotische Theorie des galvanischen Elementes. Helmholtz. Elektrolytische Lösungstension. Auf Grundlage der Theorien von van't Hoff und Arrhenius konnte W. Ostwald (Z. f. physik. Chem. 2, 270, 1888) zeigen, daß in vielen Fällen das Massenwirkungsgesetz auch Gültigkeit behält, wenn einzelne der reagierenden Bestandteile Ionen sind (vgl. die Artikel „Ionen" und „Chemisches Gleichgewicht"). Ein Jahr später gab W. Nernst seine osmotische Theorie des galvanischen Elementes (Z. f. physik. Chem. 4, 129, 1889), die den Zusammenhang zwischen elektromotorischer Kraft (EMK) und osmotischem Druck aufdeckte, nachdem schon H. Helmholtz früher gezeigt hatte, wie man die EMK gewisser galvanischer Ketten aus anderen physikalischen Daten, nämlich den Dampfspannungen der Lösungen und den Hittorfschen Ueberführungszahlen, berechnen kann. Er führte auch den anschau-

Digitized by Google

lichen Begriff der „elektrischen Lösungstension" ein. Sie hat den Charakter eines Druckes und bezeichnet die Fähigkeit gewisser Stoffe, namentlich der Metalle, in Gestalt von Ionen in Lösung zu gehen. Ihr entgegen wirkt der osmotische Druck der zugehörigen Ionen, der sie unter Umständen gerade kompensieren kann. Es kann also die elektrolytische Lösungstension durch den gleich großen entgegenwirkenden osmotischen Druck ausgedrückt werden. Ist sie größer als der entgegenwirkende osmotische Druck, so gehen neue Ionen in Lösung, und es entsteht ein Potentialsprung, indem das Metall negativ, die Lösung positiv geladen wird. Ist sie kleiner, so gehen umgekehrt Metallionen aus der Lösung heraus und schlagen sich auf das Metall nieder, indem sie dieses positiv laden, während durch die übrig gebliebenen negativen Ionen die Lösung negativ elektrisch wird. Bei Stoffen, die negative Ionen liefern, z. B. Jod, herrscht vollkommene Analogie. Ist der osmotische Druck der Jodionen größer als die elektrolytische Lösungstension, so werden Jodionen in den Zustand des gewöhnlichen Jods übergehen, und die „Jodelektrode" wird negativ elektrisch; im anderen Fall ladet sie sich positiv elektrisch.

Die quantitative Beziehung zwischen EMK und osmotischem Druck wird durch die Formel $E = \frac{RT}{n_e F} \ln \frac{P}{p}$ geliefert, wo E die EMK, R die Gaskonstante, F = 96540 Coulomb, n_e die Wertigkeit der Metallionen, T die absolute Temperatur, P die elektrolytische Lösungstension und p den osmotischen Druck der Metallionen bedeuten (s. den Artikel „Potential, Elektrochemisches Potential").

16. Konzentrationskette. Flüssigkeitskette. Klemmspannung. Innerer Widerstand. Aeußerer Widerstand. Badspannung. Elektrische Grenzkräfte. Der Wert des Einzelpotentials wird uns nicht geliefert, da P unbekannt ist. Dagegen gestattet uns die Formel, wenn wir sie auf beide Elektroden einer Konzentrationskette, z. B. Silber/konzentriertere Silbersalzlösung / verdünntere Silbersalzlösung / Silber anwenden (es gibt noch andere Arten von Konzentrationsketten), die Berechnung der EMK dieser Kette, da dann P herausfällt. Es gilt $E = \frac{RT}{F} \ln \frac{p}{p_1}$, wo p den osmotischen Druck der Silberionen in der ersten, p_1 in der zweiten Lösung bedeuten. Allerdings ist hierbei nicht die an der Berührungsstelle der beiden Lösungen auftretende Potentialdifferenz berücksichtigt, die infolge der verschiedenen Wanderungsgeschwindigkeiten des positiven und negativen Ions der Silbersalzlösung auftreten. Auch für derartige Flüssigkeistketten hat uns wiederum Nernst die Formel geliefert. Im vorliegenden Fall gilt $E' = \frac{l_k - l_A}{l_k + l_A} \frac{RT}{F} \ln \frac{p}{p_1}$, wo l_k und l_A die Wanderungsgeschwindigkeit des Kations und Anions, p und p_1 die osmotischen Drucke der beiden Lösungen bedeuten. Der Wert für E' erreicht selten die Größe von einigen Hundertstel Volt.

Es sei ausdrücklich darauf hingewiesen, daß die im Vorhergehenden besprochenen Gesetzmäßigkeiten nur bei verdünnten Lösungen anzutreffen sind (vgl. den Artikel „Galvanische Ketten").

Bei allen Messsungen der EMK eines galvanischen Elementes erhalten wir stets die Summe von mindestens zwei Potentialsprüngen. Eingeschaltet sei hier, daß man von der EMK eines Elementes die Klemmspannung zu unterscheiden hat, unter der man die Spannung versteht, die das lediglich durch einen äußeren Widerstand geschlossene Element zwischen den beiden Polen zeigt. EMK und Klemmspannung verhalten sich zueinander, wie der gesamte Widerstand des Stromkreises, der sich aus dem Widerstand des Elementes selbst, dem sogenannten inneren Widerstand, und dem Widerstand des Schließungskreises, dem äußeren Widerstand, zusammensetzt, zu dem äußeren Widerstand. Unter Badspannung schließlich versteht man die Spannung zwischen zwie in ein ‚Bad' d. h. einen Elektrolyten tauchenden Elektroden. Sie setzt sich bei Stromdurchgang, der durch eine äußere EMK veranlaßt zu denken ist, zusammen aus den beiden an den Elektroden auftretenden Potentialsprüngen, zu denen sich, falls das Bad aus verschiedenen Schichten besteht, noch die an diesen Grenzflächen vorhandenen Potentialsprünge, die elektrischen Grenzkräfte, kommen, und dem Potentialabfall, der nach dem Ohmschen Gesetz infolge des Widerstandes des Bades sich einstellt.

17. Einzelspannung. Normalelektrode. Elektrolytische Potentiale. Spannungsreihe. Nach dieser Abschweifung kehren wir zu der Frage zurück, die wir stellen wollten: können wir nicht den Wert einer Einzelspannung erfahren? Wenn wir den Wert der oben besprochenen elektrolytischen Lösungstensionen für die einzelnen Metalle kennen würden, so könnten wir es; wir kennen sie aber nicht, wir können sie nur umgekehrt aus jenen berechnen. Ein Weg ergibt sich aus der Möglichkeit ein solches Element herzustellen, bei dem die Spannung an der einen Elektrode gleich Null ist, dann ist offenbar die gesamte am Element gemessene Spannung gleich der an der anderen Elektrode. In der Tat ist nun die Auffindung

Digitized by Google

einer solchen Elektrode (z. B. Quecksilber-Tropfelektrode) geglückt — wenigstens liegt eine große Wahrscheinlichkeit für eine solche Annahme vor —, und wir sind somit auch zur Kenntnis der Einzelspannung, die z. B. ein Metall gegenüber seiner Lösung zeigt, gelangt. Da aber diesen absoluten Werten noch gewisse Unsicherheiten anhaften, so nimmt man die Zählung der Einzelpotentiale in der Weise vor, daß man willkürlich den Potentialsprung einer gut definierten, konstanten und leicht reproduzierbaren Elektrode, einer sogenannten Normalelektrode, z. B. der Wasserstoffelektrode bei Atmosphärendruck, bespült von einer an $H^{\cdot}$-Ionen einfach normalen Säurelösung, gleich Null setzt. Die EMK einer Kette zusammengesetzt aus dieser Elektrode und der zu untersuchenden gibt dann direkt (bis auf die kleine Potentialdifferenz an der Berührungsstelle der beiden Flüssigkeiten) das Einzelpotential an. Man hat es für viele Metalle und andere Elemente bestimmt, in dem man als Lösung eine solche nahm, die das zugehörige Ion in einfach normaler Konzentration enthielt; diese Werte bezeichnet man als elektrolytische Potentiale. Ordnet man sie in eine Reihe, so erhält man die Spannungsreihe, an deren einem Ende die unedlen Metalle stehen, welche eine hohe elektrolytische Lösungstension haben, während das andere Ende die edlen Metalle mit niedriger Tension bilden (vgl. auch den Artikel „Potential, Elektrochemisches Potential").

Auch für Oxydations- und Reduktionsmittel lassen sich unter Benutzung unangreifbarer Elektroden Einzelspannungen angeben, die ein Maß für die Stärke ihrer oxydierenden oder reduzierenden Kraft sind.

18. EMK und chemisches Gleichgewicht. Vorbedingung für die Entstehung eines elektrischen Stromes. Bemerkt sei, daß sich die EMK eines umkehrbar arbeitenden Elementes aus der chemischen Gleichgewichtskonstanten der im Element sich abspielenden chemischen Reaktion berechnen läßt (van 't Hoff 1886). Dies gilt nicht für den einzelnen Potentialsprung, da sich eine chemische Reaktion stets aus (mindestens) zwei Vorgängen, einem Oxydations- und Reduktionsvorgang, zusammensetzt, von denen der eine sich an der einen, der andere an der anderen Elektrode abspielt. In einem jeden Element müssen diese beiden Vorgänge stets räumlich getrennt eintreten, es ist dies eine notwendige Vorbedingung für die Entstehung eines elektrischen Stromes. Spielen sie sich an gleicher Stelle ab, so bekommt man keinen Strom. Bei der Betätigung des Daniellelementes wird Zink gelöst und Kupfer niedergeschlagen. Es findet dieselbe chemische Reaktion statt wie beim Eintauchen eines Zinkstabes in eine Kupfersulfatlösung (oder eine Lösung der beiden gemischten Sulfate). In diesem Falle geht am Zink sowohl der Oxydationsvorgang, nämlich die Auflösung des Zinks, als auch der Reduktionsvorgang, nämlich die Ausfällung des Kupfers vor sich, die Elektrizitäten haben die Möglichkeit sich dort auszugleichen, und damit geht eben die Möglichkeit verloren, den Ausgleich an anderen Stellen eintreten zu lassen, d. h. einen elektrischen Strom zu bekommen. Eine chemische Reaktion zweier Körper aufeinander ist, allgemein gesprochen, nur dann elektrisch verwertbar, wenn einmal dabei Elektrizitätsmengen entstehen oder verschwinden, d. h. Ionen ihre Ladung ändern, und sodann die beiden Stoffe räumlich getrennt die Umwandlung erleiden können.

19. Oxydations- und Reduktionserscheinungen. Es erübrigt noch, für elektrische Vorgänge Oxydations- und Reduktionserscheinungen zu definieren. Man kann sagen, ein Stoff wird oxydiert, wenn er seine positive Ladung vermehrt (oder eine positive aufnimmt) oder seine negative vermindert, und er wird reduziert, wenn er seine negative Ladung vermehrt oder seine positive vermindert. Es handelt sich also nur um einen Wechsel der Ionenladungen; eine Mitwirkung des Sauerstoffs braucht nicht vorzuliegen.

20. Polarisation. Polarisationsstrom. Zersetzungswert. Le Blanc. Wir wenden uns jetzt zu der Erörterung der Erscheinungen, die bei Stromdurchgang an angreifbaren und unangreifbaren Elektroden eintreten. Da ist zunächst zu bemerken, daß bei allen Elektrolysen in mehr oder minder hohem Maße eine elektromotorische Gegenkraft auftritt, indem der an jeder Elektrode vorhandene Potentialsprung eine Erhöhung erfährt. Diese Aenderung bezeichnet man mit dem Namen Polarisation. Besonders deutlich tritt sie an unangreifbaren Elektroden ein. Nehmen wir zwei in Salzsäure tauchende Platinelektroden, zwischen denen im Ruhezustande die Spannung Null herrscht, und leiten einen Strom hindurch, so erleidet die EMK des elektrolysierenden Stromes eine deutliche Schwächung. Unterbrechen wir den Primärstrom und verbinden die beiden Elektroden unter Einschaltung eines Galvanometers, so wird von diesem ein dem Primärstrom entgegengerichteter Strom angezeigt, der schnell schwächer und schwächer wird, und Polarisationsstrom heißt. Stellt man obigen Versuch in der Weise an, daß man an die beiden Elektroden eine nach Willkür zu regelnde EMK legt, so beobachten wir an dem Galvanometer schon bei der geringsten eingeschalteten EMK einen Stromstoß, der aber bald aufhört; die Nadel des

Digitized by Google

Galvanometers geht in die Nullstellung. Bei Vergrößerung der EMK wiederholt sich das Spiel, bis von einer bestimmten EMK an die Nadel nicht mehr in die Nullstellung zurückgeht, sondern ein dauernder Strom erhalten bleibt. Man bezeichnet diesen Wert der EMK als den Zersetzungswert (nach Le Blanc 1891).

21. Ueberspannung. Allerdings so ideal, wie hier geschildert, vollzieht sich der Versuch nicht infolge sekundärer Störungen insbesondere durch Diffusion, wodurch die an den Elektroden ausgeschiedenen Produkte, Chlor und Wasserstoff, von den Elektroden fortgeführt werden. Diese letzteren sind nämlich neben den Konzentrationsänderungen der in der Flüssigkeit befindlichen Ionen, von denen wir hier absehen wollen, die Ursache für die Entstehung der Polarisation infolge ihres Bestrebens in den Ionenzustand zurückzukehren. Mit steigender zugeschalteter EMK wächst ihre Konzentration, doch nach dem Gesetz von der Erhaltung der Energie nur so lange, bis die maximale Arbeit, welche bei ihrer Vereinigung zu Salzsäure von der benutzten Konzentration erhalten werden kann, gleich der aufgewendeten elektrischen Energie ist. Dann ist die EMK der Polarisation gleich der eingeschalteten EMK, und der Galvanometerzeiger steht auf Null. Die Konzentration der ausgeschiedenen Stoffe kann aber nicht bis ins unendliche wachsen, sondern nur bis zu einem durch die äußeren Umstände bedingten Maximum. Ist dies erreicht, so kann die darüber hinaus zugeschaltete EMK nicht mehr kompensiert werden und ein dauernder Strom tritt ein.

Die gleichen Ueberlegungen gelten, wenn an der Kathode an Stelle von Wasserstoff ein Metall ausgeschieden wird. Um dies zu verstehen, muß man berücksichtigen, daß die Konzentration des ausgeschiedenen Metalls ebenfalls allmählich steigt und erst bei gewisser angelegter EMK, der Zersetzungsspannung, die Konzentration des massiven Metalls erreicht. Ist dieser Punkt erreicht, so ist der Potentialsprung an der Kathode genau so groß wie der, den das massive Metall, in die gleiche Lösung getaucht, freiwillig zeigt.

Ist der ausgeschiedene Stoff gasförmig, so liegen die Verhältnisse komplizierter. Wasserstoff von Atmosphärendruck z. B. hat zwar mit platinierten Platin- oder Palladium-Elektroden gegen eine Lösung, die an H^+-Ionen einfach normal ist, einen bestimmten Potentialsprung. Eine solche Elektrode ist einer Metallelektrode völlig vergleichbar. Zersetzen wir aber eine an H^+-Ionen einfach normale Säure in der oben geschilderten Weise mit nichtplatinierten Platinkathoden oder Kathoden aus anderem Metall und messen bei dem Zersetzungspunkt den Potentialsprung, so ist er größer als der der obigen umkehrbaren Wasserstoffelektrode. Die Differenz bezeichnet man als Ueberspannung, sie hängt mit Uebersättigungserscheinungen zusammen und ist abhängig von der Natur des sich ausscheidenden Gases und des als unangreifbare Elektrode dienenden Metalls.

22. Elektrolyse gemischter Lösungen. Elektroanalyse. Bei der Elektrolyse gemischter Lösungen geschieht die Leitung natürlich durch sämtliche in der Lösung vorhandene Ionen; an den Elektroden geht aber immer der Vorgang vor sich, der am leichtesten geschehen kann. Da nun die Zersetzungswerte verschieden groß sind, so wird sich zunächst das Metall mit dem geringsten Zersetzungswert ausscheiden. Diese Tatsache ist wichtig für die Elektroanalyse (vgl. den Artikel „Chemische Analyse"), die man hiernach mit abgestufter EMK ausführen kann, wofern nur die Zersetzungswerte bei gleicher Ionenkonzentration weit genug auseinanderliegen. Denn es ist zu berücksichtigen, daß mit fortschreitender Ausfällung, also mit fallender Ionenkonzentration, der Zersetzungswert steigt. Durch passende Anordnung werden nach Ausfällung des einen Metalls nur unwägbare Spuren des anderen mit ausgefällt sein und das letztere Metall kann dann erst bei gesteigerter Spannung ausgefällt werden.

23. Stromdichte. Primäre und sekundäre Elektrolyse. Elektrosynthese. Früher nahm man an, daß alle Ionen, die durch Leitung an die Elektrode geführt werden, auch ausgeschieden werden, z. B. in einer gemischten Kalium-, Cadmium-, Kupfer-, Silbersalzlösung, welcher Säure zugesetzt ist, gleichzeitig an der Kathode K^+, Cd^{++}, H^+, Cu^{++}, Ag^+, falls die Spannung genügend hoch ist. Das ausgeschiedene Kalium sollte dann den Wasserstoff aus dem Wasser, das Cadmium aus dem Cadmiumsalz, das Kupfer aus dem Kupfersalz, das Silber aus dem Silbersalz fällen, der Wasserstoff wiederum Cadmium, Kupfer, Silber, das ausgeschiedene Cadmium Kupfer und Silber und das Kupfer Silber. Das Endprodukt ist tatsächlich bei nicht zu hoher Stromdichte, d. h. Stromstärke pro Einheit der Elektrodenoberfläche lediglich Silber. Dieses sollte nach der alten Anschauung, wie ersichtlich, der Hauptsache nach durch Ausfällung, also sekundär entstanden sein, während es nach der neueren als primär direkt durch den Strom ausgeschieden angenommen wird. Man spricht demgemäß von primärer und sekundärer Elektrolyse. Solange die Konzentration der in Frage kommenden Ionen an der Elektrode groß genug ist, liegt kein Grund zur Annahme einer sekundären Reaktion bei der einfachen Aus-

by Google

scheidung vor. In manchen Fällen treten sekundäre Reaktionen ein durch Einwirkung der ausgeschiedenen Molekeln aufeinander oder auf andere an der Elektrode befindliche Produkte. So reagieren die bei der Elektrolyse von essigsaurer Natriumlösung an der Anode ausgeschiedenen Radikale aufeinander: $2CH_3COO \rightarrow C_2H_6 + 2CO_2$. Man kann auf solche Weise Elektrosynthesen ausführen, bei denen übrigens auch die abgestuften Potentiale eine Rolle spielen. Daneben sind katalytische Einflüsse wirksam (s. den Artikel „Synthese").

24. Zwitterelemente. Elektrische Zerstäubung. Auf Seite 401 haben wir von Stoffen gesprochen, die, wie die Metalle, positive Ionen liefern und von solchen, die, wie Jod, negative Ionen bilden. Man kann die Frage aufwerfen, ob es Elemente gibt, die sowohl positive wie negative Ionen bilden können. In der Tat gibt es solche Zwitterelemente. Das prägnanteste Beispiel ist das Tellur. Stellen wir uns eine völlig symmetrische Anordnung in der Weise her, daß wir zwei Tellurelektroden in Kalilauge von beliebiger Konzentration tauchen, und leiten wir einen Strom hindurch, so bemerken wir an keiner der Elektroden eine Gasentwickelung. Beide Elektroden gehen in Lösung, die Anode unter Bildung einer farblosen Lösung von tellurigsaurem Kalium, die Kathode unter Bildung einer roten Lösung von Tellurkalium, die bei Gegenwart von Luft graues metallisches Tellur ausscheidet.

Andere Elemente wie Antimon, Arsen, Selen, Jod zeigen unter bestimmten Umständen ebenfalls die Fähigkeit, anodisch und kathodisch in Lösung zu gehen.

Bei der anodischen Auflösung der Metalle haben wir die Vorstellung entwickelt, daß sie primär als Ionen in Lösung gehen. Es erscheint aber auch die Annahme als grundsätzlich zulässig, daß das negative Ion der Lösung entladen wird und die entladene Molekel chemisch außerordentlich schnell auf das Metall reagiert. Die quantitativen Beziehungen würden die gleichen bleiben.

Bei Anwendung hoher Spannungen tritt namentlich in schlechten Elektrolyten bei Metallelektroden übrigens noch eine andere Erscheinung auf: die der elektrischen Zerstäubung. Man kann auf diese Weise kolloide Metalllösungen herstellen (vgl. auch den Artikel „Kathodenstrahlen").

25. Passivität. Wir kommen nun zu der Besprechung der auffälligen Erscheinungen, die man neuerdings beim Studium der einfachen Kombinationen Metall/Metallsalzlösung/Metall bei Stromdurchgang gefunden hat. Man mußte erwarten, daß hier bei genügender Ionenkonzentration keine Polarisation auftreten würde. Tatsächlich trat aber eine solche in vielen Fällen sowohl anodisch wie kathodisch ein. Wie läßt sich diese nun erklären? Man könnte daran denken, daß dem Ladungswechsel selbst, den wir als unendlich schnell annehmen, sich wechselnde Hindernisse in den Weg stellten; dann würde man aber ein neues hypothetisches Element einführen und die ganze chemische Theorie der Polarisation fallen lassen. Wir wollen uns also zunächst nach anderen Erklärungsmöglichkeiten umsehen. Einen Fingerzeig dabei bietet die Beobachtung, daß Spuren von schwefelsaurem Strychnin, Brucin oder Gelatine, die den Verlauf gewisser chemischer Reaktionen verzögern, auch hier vielfach und zwar an beiden Elektroden gleichzeitig polarisationserhöhend wirken. Es wird dadurch wahrscheinlich gemacht, daß es sich hier ebenfalls um einen chemischen Vorgang handelt, der durch seine Verlangsamung die Polarisation erhöht, und es drängt sich, wenn wir zunächst die Anode ins Auge fassen, die vorhin angedeutete Auffassung der sekundären anodischen Auflösung eines Metalls uns auf. Das ausgeschiedene Radikal oder Element vermag nicht schnell genug mit dem Metall zu reagieren; seine Konzentration an der Elektrode und damit der Potentialsprung steigt an. Aber auch bei Annahme der primären Ladungsaufnahme findet eine chemische Reaktion an der Anode statt. Wir brauchen nur daran zu denken, daß die Ionen zum weitaus größten Teil nach manchen Anzeichen nicht frei, sondern mit verschiedenen Wassermolekeln zu Komplexionen verbunden sind. Infolgedessen ist die Konzentration der freien Ionen, auf die es allein ankommt, trotz genügender Salzkonzentration stets gering, und es wird, wenn die neu gebildeten Ionen nicht äußerst schnell in die Hydratverbindung eintreten, eine Konzentrationserhöhung derselben und damit eine Polarisation einsetzen.

An der Kathode wird es umgekehrt infolge der zu geringen Aufspaltungsgeschwindigkeit zu einer Konzentrationsverminderung und daher gleichfalls zu einer Polarisation kommen. Insbesondere das gleichzeitige Auftreten der Polarisation an Kathode und Anode findet durch diese Annahme befriedigende Erklärung, denn es handelt sich um dieselbe Reaktion: Ionenhydrat $\rightleftarrows$ Ion + Wasser, die sich in der einen oder anderen Richtung abspielt und jede katalytische Beeinflussung muß die Geschwindigkeit der Reaktion in gleichem Verhältnis ändern. Neben dieser Ursache kann für die kathodische Polarisation auch noch Uebersättigung in Betracht kommen, die dadurch hervorgerufen wird, daß das entladene Metallion zunächst im gelösten Zustande bleibt und nicht schnell genug als festes Metall sich ausscheidet.

Diese soeben besprochenen Versuche leiten

Digitized by Google

uns nun über zu einer Gruppe von Erscheinungen, die scheinbar nichts mit ihnen zu tun haben, tatsächlich aber eng damit verknüpft sind, nämlich zu denen der Passivität.

26. Keir. Die ersten hierher gehörigen Beobachtungen sind bereits Ende des 18. Jahrhunderts von J. Keir gemacht worden, sie sind also ebenso alt wie der Galvanismus selbst. Er beschreibt sie folgendermaßen (die Zitate sind aus Ostwald, Elektrochemie, entnommen): „Ich digerierte ein Stück fein Silber in reiner farbloser Salpetersäure, und während der Auflösung, noch ehe die Sättigung vollendet war, goß ich einen Teil der Flüssigkeit in ein Weinglas auf reine und frisch geschabte Stücke von Eisendraht, und bemerkte einen plötzlichen und reichlichen Niederschlag von Silber. Der Niederschlag war anfangs schwarz, nahm aber dann die Gestalt des Silbers an, und war fünf- bis sechsmal größer im Durchmesser, als das Stückchen Eisendraht, den er umgab. Die Wirkung der Säure auf das Eisen hielt eine Weile an, worauf sie aufhörte: das Silber löste sich wieder auf, die Flüssigkeit wurde klar, und das Eisen lag ruhig und glänzend in der Flüssigkeit am Boden des Gefäßes, wo es mehrere Wochen lang blieb, ohne daß es die mindeste Veränderung erlitt oder einen Niederschlag des Silbers bewirkte."

Keir wies weiterhin nach, daß nicht eine Veränderung der Lösung, sondern des Eisens vor sich gegangen war. Dieselbe Lösung erwies sich nämlich gegen frisches Eisen wieder aktiv; auch gegenüber dem alten Stück Eisen wurde sie wirksam, wenn dieses unter der Lösung gekratzt wurde. Ja, hierzu genügte das Hereinbringen eines frischen Eisenstückes (und, wie man hinzufügen muß, seine Berührung mit dem alten).

27. Wetzlar. Fechner. Nahezu 40 Jahre dauerte es, bis diesen Erscheinungen von Wetzlar und Fechner weiter nachgegangen wurde. Diese Forscher wurden bereits auf die elektrochemischen Unterschiede zwischen dem aktiven und nicht aktiven Eisen aufmerksam. Speziell Fechner stellte elektrische Messungen an und zeigte, daß bei der Kombination von Eisen mit Silber zu einem Element, sich das Eisen solange elektrisch positiv zeigte, als es die Fähigkeit besaß, sich freiwillig aufzulösen und chemisch zu reagieren. Hörte die chemische Reaktion auf, so wurde es negativ elektrisch.

28. Schönbein. Faraday. Oxydtheorie. Müller und Königsberger. Wertigkeitstheorie. Reaktionsgeschwindigkeitstheorie. Katalytische Einflüsse. Förster. Im Jahre 1836 nahm dann Schönbein die Untersuchungen auf, variierte sie mannigfach und zeigte vor allem, daß der nicht aktive Zustand beim Eisen auch dadurch hervorgerufen werden kann, daß man dieses zur Anode in wässerigen Lösungen von Sauerstoffsäuren macht. Schon verdünnte Lösungen genügen. Er prägte den Ausdruck „passiv" für diesen Zustand, der fortan beibehalten wurde.

Faraday äußerte sich zu diesen Erscheinungen und stellte folgende Ansicht auf: „Ich habe durchaus den Eindruck, daß die Oberfläche des Eisens oxydiert ist, oder daß die Oberflächenschicht des Metalls sich in einem Verhältnis zum Sauerstoff des Elektrolyts befindet, welches einer Oxydation äquivalent ist. Da diese Schicht ihre Verwandtschaft zum Sauerstoff befriedigt hat, und unter den vorhandenen Umständen nicht von der Säure aufgelöst wird, so tritt weder eine Erneuerung der Oberfläche, noch ein Wiederbeginn der Anziehung der sukzessiven Teile des Eisens auf die Elemente der sukzessiven Anteile des Elektrolyts ein, und deshalb findet auch nicht die sukzessive chemische Wirkung statt, durch welche der elektrische Strom (welcher bestimmt ist, sowohl was seine Entstehung, als seine Wirkung anlangt) fortgesetzt werden kann."

Diese Oxydtheorie ist, wenn auch in mancherlei Variation, bis in die Neuzeit hinein von einer großen Anzahl von Forschern festgehalten worden, ohne daß aber ein entscheidender Beweis für ihre Richtigkeit beigebracht werden konnte. Im Gegenteil, der Versuch z. B., optisch eine Aenderung des Reflexionsvermögens bei passivem Eisen gegenüber aktivem nachzuweisen, schlug fehl, wiewohl die Methode so empfindlich war, daß das Auftreten von Schichten von molekularer Dicke (0,8 $\mu\mu$) noch hätte nachgewiesen werden können (W. J. Müller und Königsberger 1907).

Eine andere Theorie, die sogenannte Wertigkeitstheorie, hat nur wenige Anhänger gefunden. Wir brauchen, da sie heute wohl allgemein verlassen ist, nicht weiter auf sie einzugehen, sondern wenden uns zu der Reaktionsgeschwindigkeitstheorie (Le Blanc 1900), die zurzeit die meisten Anhänger hat. Auf ihrer Grundlage wollen wir die Erscheinungen der Passivität, die, wie man im letzten Jahrzehnt gefunden hat, außerordentlich verbreitet ist, in kurzen Zügen darstellen.

Daß in einer ganzen Anzahl von Fällen ein Metall bei anodischem Angriff durch die Bildung einer Oxydhaut oder allgemeiner gesprochen einer schützenden Decke vor weiterem Angriff bewahrt bleibt, lehrt der Augenschein. Blei ist z. B. als Anode bei nicht zu geringer Stromdichte in Natriumchromatlösung unlöslich und bedeckt sich mit einer sichtbaren Schicht von Chromat bezw. Superoxyd, an der sich bei weiterer

Digitized by Google

Elektrolyse Sauerstoff entwickelt. Analoge Erscheinungen treten stets auf, wenn der Elektrolyt lediglich aus einem Salz besteht, dessen Anion mit dem Anodenmetall eine schwerlösliche Verbindung bildet.

Sehr bemerkenswert ist, daß glatte Auflösung des Anodenmetalles erfolgt, wenn man zu dem vorher gekennzeichneten Elektrolyten einen zweiten im Ueberschuß setzt, dessen Anion mit dem Anodenmetall eine leicht lösliche Verbindung gibt. Setzt man etwa zu obiger Lösung von Natriumchromat Natriumchlorat im Ueberschuß, so geht das Blei anodisch glatt in Lösung, und es entsteht quantitativ ein schöner Niederschlag, der von der blank bleibenden Elektrode abrollt. Dieses Verhalten hat gelegentlich in der Technik zur Darstellung schwer löslicher Verbindungen Anwendung gefunden, und es wird dadurch hervorgerufen, daß sich in der gemischten Lösung infolge des Mitwirkens des überschüssigen Chlorationen eine von Chromationen freie Flüssigkeitsschicht unmittelbar an der Elektrode bald nach Beginn der Elektrolyse ausbildet, die das Entstehen des Niederschlages unmittelbar an der Elektrode und damit ein Haften desselben verhindert. Nur bei Beginn der Elektrolyse kann sich in dem kleinen Zeitmoment, der zur Ausbildung jener von Chromationen freien Schicht benötigt wird, direkt an der Anode Bleichromat bilden, doch ist dieser Niederschlag kein Schutz, denn eine dichte, für Ionen undurchlässige Schicht entsteht nur dann, wenn sie dauernd geflickt werden kann.

Die Erwartung liegt nun nahe, daß in allen Fällen, in denen die Passivität durch die Bildung eines Niederschlages hervorgerufen wird, sich analoge Erscheinungen hervorrufen lassen. Nickel ist bei der anodischen Behandlung in Kaliumsulfatlösung passiv; setzt man Chlornatrium hinzu, so findet wohl eine Auflösung von Nickel statt, es wird aber kein von der Elektrode abrollender Niederschlag sichtbar.

Diese Beobachtungen legten schon den Gedanken nahe, daß nicht alle Fälle der Passivität dadurch zu erklären sind, daß das ursprünglich aktive Metall durch einen schützenden Ueberzug passiv wird, sondern daß hier noch andere Ursachen mitspielen. Und da bringen uns nun die vorher mitgeteilten Polarisationsmessungen an Metallen, die in die zugehörigen Metallsalzlösungen tauchen, weitere Klärung. Wir haben gesehen, daß sie am einfachsten durch mangelnde chemische Reaktionsgeschwindigkeit, insbesondere durch mangelnde Bildungs- und Aufspaltungsgeschwindigkeit von Ionenhydraten zu erklären sind; gibt man dies zu, so lassen sich auch die Passivitätsphänomene, die nicht durch einen Niederschlag hervorgerufen werden, in analoger Weise deuten. Bei den passiven Metallen erfolgt die Ionenhydration so langsam (eine gewisse Auflösung findet stets statt), daß die Konzentration der freien Ionen und damit der Potentialsprung an der Elektrode in kurzer Zeit so hoch ansteigt, daß Ausscheidung des negativen Radikals bezw. von Sauerstoff erfolgen kann. Qualitativ bieten diese Erscheinungen gegenüber den früher geschilderten Versuchen nichts Neues und sind nur quantitativ insofern bemerkenswert, als die chemische Polarisation so stark geworden ist, daß die ausgeschiedenen Radikale bezw. ihre Zersetzungsprodukte sichtbar werden. Wir werden von diesem Standpunkte aus unter Passivitätserscheinungen alle zu verstehen haben, bei denen chemische Polarisation auftritt, und wir sehen, daß die Passivität nicht Ausnahme, sondern Regel ist, und daß sie nicht an sauerstoffhaltige Anionen gebunden ist, wie man annahm, sondern auch bei Chloriden auftritt, ebenso in anderen Lösungsmitteln, und vor allem auch an der Kathode. Ueber ihre Abhängigkeit von verschiedenen Faktoren sind wir freilich noch wenig unterrichtet. Die große Mannigfaltigkeit und geringe Reproduzierbarkeit der Erscheinungen rührt von den wechselnden und schwer faßbaren katalytischen Einflüssen her. Nach den Untersuchungen von F. Förster und seiner Mitarbeiter aktiviert Wasserstoffbeladung und passiviert Sauerstoffbeladung.

29. Verschiebung der Wertigkeit. Für die eigenartige Verschiebung der Wertigkeit, die bei der Auflösung mancher Metalle zutage tritt, wird man vielfach — es gibt auch Fälle, die anders zu erklären sind — dieselben Gründe anführen können. Ein besonders auffälliges Beispiel bietet das Chrom (Hittorf 1898). Bleibt es einige Zeit an der Luft liegen oder wird es Anode z. B. in Schwefelsäurelösung, so hat es nahezu ganz die Fähigkeit verloren, zweiwertig in Lösung zu gehen; durch Erwärmen in verdünnter Salzsäure erhält es sie wieder. In diesem letzteren Zustand verhält es sich wie ein unedles Metall, etwa wie Zink, löst sich freiwillig auf und liefert Arbeit, während es im passiven Zustand hauptsächlich sechswertige Ionen liefert und sich elektromotorisch wie ein edles Metall verhält. Wir können auf diese Weise unedle in edle Metalle verwandeln, indem sich, wenn wir bei der primären Ionenbildung der Metalle bleiben, die Hydratationsgeschwindigkeiten der beiden verschiedenwertigen Ionen verschieben. Würden beide zu gering, so müßte sich Sauerstoff entwickeln.

Mit steigender Temperatur beobachtet man ausnahmslos eine abnehmende Passivi-

Digitized by Google

rung, also, wie sonst stets, eine Steigerung der chemischen Reaktionsgeschwindigkeit.

30. Ventilzellen. Ein Spezialfall liegt vor, wenn an den Elektroden feste oder gasförmige Schichten entstehen, die für die Ionen unpassierbar sind, wie bei den Ventilzellen, welche die Umwandlung von Wechselstrom in Gleichstrom gestatten. Verwendet man z. B. Aluminium als Anode in einer Lösung von Alkaliphosphat oder von Alkalisalzen der Fettsäuren und irgendein anderes passendes Metall als Kathode, so wird der Durchgang eines gleichgerichteten Stromes selbst von mehreren Hundert Volt Spannung so gut wie ganz verhindert. Nimmt man Wechselstrom, so können die Stromstöße in der einen Richtung den Elektrolyten nicht passieren, in der anderen gehen sie aber durch ihn hindurch, weil dann, da die Möglichkeit des Ausflickens fehlt, eine Zerstörung der Schicht außerordentlich schnell herbeigeführt wird. Die Isolation ist nicht so beständig, daß sie eine dauernde Ausbesserung entbehren könnte; wäre sie es, so würde sie sich eben zur Umwandlung von Wechselstrom in Gleichstrom nicht eignen.

31. Elektrolyse ohne Elektroden. In den Ventilzellen findet eine Entladung der Ionen nicht mehr unmittelbar an der Elektrode, sondern an der isolierenden Schicht statt, und das negative Elektron wandert allein durch die Schicht. Die gleiche Erscheinung tritt ein, wenn wir die eine Elektrode innerhalb, die andere oberhalb des Elektrolyten anordnen: wir bemerken dann bei genügendem Potentialgefälle an der Flüssigkeitsoberfläche eine Ausscheidung des positiven bezw. negativen Bestandteils und man spricht von einer Elektrolyse ohne Elektrode. Die chemische Polarisation spielt bei diesen Elektrolysen nur eine untergeordnete Rolle. Natürlich können auch Uebergänge auftreten.

32. Elektrothermische Prozesse. Elektrische Oefen. Aus vorstehender gedrängter Darstellung unseres elektrochemischen Wissens kann man entnehmen, wie vielseitig die Probleme sind, welche dieses Wissenschaftsgebiet umfaßt. Neben den Vorgängen in wässeriger Lösung, die ja die größte Wichtigkeit haben, beginnt man jetzt auch den Vorgängen in anderen Lösungsmitteln, in Schmelzen und im Gasraum lebhaftes Interesse zuzuwenden. Schließlich können wir die ganze Chemie als Elektrochemie bezeichnen, wenn wir an die radioaktiven (vgl. den Artikel „Radioaktivität") Erscheinungen denken und an die Hypothesen über den Aufbau der Atome aus positiv und negativ geladenen Teilchen.

Die Entwickelung der wissenschaftlichen Elektrochemie ist auch der Technik zugute gekommen. So werden, um nur einige Beispiele zu nennen, in großem Maßstabe elektrochemisch dargestellt: Chlor, Chlorate, Perchlorate, Persulfate, Bleichlaugen, Natrium, Aluminium. Ferner werden viele Metalle elektrolytisch raffiniert und Chromoxydsalzlösungen zu Chromsäure regeneriert. Neben diesen elektrochemischen spielen die elektrothermischen Prozesse eine große Rolle, bei denen die elektrische Energie ausschließlich oder in der Hauptsache zur Erzeugung hoher Temperatur dient, wie bei der Calciumkarbiddarstellung, die in elektrischen Oefen vorgenommen wird, mit welchem Namen man Anordnungen bezeichnet, in denen elektrische Energie in Wärme umgewandelt wird. Einen Widerstandsofen erhält man, indem man die beiden Enden eines Stromkreises, in dem eine genügend starke Elektrizitätsquelle vorhanden ist, isoliert durch zwei gegenüberliegende Wandungen des Ofens führt und sie im Innern durch einen Stab aus widerstandsfähigem Material, etwa Kohle, verbindet, der einen im Verhältnis zum anderen Teil des Stromkreises hohen elektrischen Widerstand besitzt. Ersetzt man den inneren Widerstand durch einen Lichtbogen, so erhält man einen Lichtbogenofen. Bei einem Induktionsofen stellt der Ofen den Sekundärkreis vor. Ein solcher Ofen hat den Vorzug, keinerlei Elektroden zur Stromzuführung zu bedürfen.

Durch Erzeugung von Hochspannungsflammen, die sich durch hohe Temperatur auszeichnen, kann die Luft zum Teil verbrannt, d. h. in Stickoxyd bezw. Stickstoffdioxyd übergeführt werden.

33. Namen der bedeutendsten Forscher. Es erübrigt noch, die Namen der bedeutendsten Forscher auf unserem Gebiet in dem letzten Vierteljahrhundert zu nennen, soweit sie nicht schon besonders erwähnt worden sind: Abegg, Bredig, Coehn, Haber, Lorenz, Luther, Noyes, Walden.

Literatur. **B. Ahrens**, *Handbuch der Elektrochemie 2. Aufl. Stuttgart 1903.* — **S. Arrhenius**, *Lehrbuch der Elektrochemie. Uebersetzt von Euler. Leipzig 1901.* — **H. Danneel**, *Elektrochemie, Sammlung Göschen, 2. Aufl. 1911.* — **P. Ferchland**, *Grundriß der reinen und angewandten Elektrochemie. Halle a. S. 1903.* — **F. Förster**, *Elektrochemie wässeriger Lösungen. Leipzig 1905.* — **F. Haber**, *Grundriß der technischen Elektrochemie auf theoretischer Grundlage. München 1898.* — **H. Jahn**, *Grundriß der Elektrochemie. 2. Aufl. Wien 1905.* — **M. Le Blanc**, *Lehrbuch der Elektrochemie 5. Aufl. Leipzig 1911.* — **W. Löb**, *Die Elektrochemie der organischen Verbindungen. 3. Aufl. Halle a. S. 1905.* — **R. Lüpke**, *Grundzüge der wissenschaftlichen Elektrochemie auf experimenteller Basis. 5. Aufl. Bearbeitet von Bose. Berlin 1907.* — **W. Ostwald**, *Elektrochemie, ihre*

Digitized by Google

Geschichte und Lehre. Leipzig 1896. — Ferner: Monographien über angewandte Elektrochemie. Herausgegeben von **V. Engelhardt.** *Halle a. S. 1902. — In bezug auf den Abschnitt „Passivität“ sei speziell verwiesen auf Abhandlung 2 und 3 der Deutschen Bunsen Gesellschaft von* **F. Förster** *(1909) und* **M. Le Blanc** *(1910), sowie auf den Artikel „Passivität der Metalle“ von* **E. Grave** *im Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik 1911.*

M. Le Blanc.

Elektrodynamik.

1. Fernkräfte und Nahewirkung. 2. Gesetz von Coulomb, elektrostatisches und magnetisches Feld, Potential. 3. Oersted, Biot und Savart, elektromagnetisches Strommaß, magnetisches Feld elektrischer Ströme, Vektorpotential. 4. Ampères Grundgesetz, elektrodynamische Apparate, elektrodynamische Stromeinheit, elektrodynamisches Potential. 5. Grundgesetz von W. Weber, Verhältnis der elektromagnetischen zur elektrostatischen Stromeinheit. 6. Maxwells Theorie: a) Bedeutung und Grundlagen. b) Mathematische Formulierung, die Hauptgleichungen für ruhende isotrope homogene Medien. c) Folgerungen aus den Maxwellschen Gleichungen (Fortpflanzungsgeschwindigkeit elektromagnetischer Störungen, Poyntingscher Energiefluß, ponderomotorische Kräfte und Maxwellsche Spannungen). 7. Die Hertzschen Gleichungen für bewegte Körper. 8. Die Lorentzsche Theorie. 9. Das Relativitätsprinzip in der Elektrodynamik.

1. Fernkräfte und Nahewirkung. Die ältere Elektrodynamik steht vollständig auf dem Boden des Kraftbegriffs, wie ihn die Newtonsche Schule für die Gravitation entwickelt hatte, also der unvermittelten Fernkraft, die der mathematischen Behandlung um so leichter zugänglich war, als sie nicht durch irgendeinen Zwischenmechanismus die Aufmerksamkeit von den beobachtbaren Kraftwirkungen ablenkte. Die Uebertragung jenes Kraftbegriffs auf elektrische Phänomene geschah durch Coulomb; und mehr als ein halbes Jahrhundert bleibt dann diese Auffassung die alleinherrschende. Charakterisiert ist diese Periode besonders durch die Entwickelung der Potentialtheorie; damit steht im Zusammenhang die Auffassung der in einem System von geladenen oder stromdurchflossenen Körpern, Magneten usw. angehäuften Energie als einer potentiellen, die in jenen Körpern selbst ihren Sitz hat. Die elektrodynamischen Gesetze dieser Periode sind Elementargesetze, d. h. sie stellen die Wirkung von Stromelementen und auf Stromelemente dar; die Wirkungen selbst sind unvermittelte und jedes Element verhält sich so, als seien die übrigen nicht vorhanden.

Der erste, der sich von dieser Vorstellung bewußt lossagte, war Faraday. Ihm, der so durchaus Physiker und gar nicht Mathematiker war, genügte die abstrakte Newtonsche Kraft nicht; ihm waren die Kraftlinien nicht nur geometrische Kurven, sondern physikalische Gebilde, die den Raum zwischen den elektrischen usw. Körpern erfüllen und den in ihm enthaltenen Stoff, Materie und Aether, in einen besonderen Spannungszustand bringen, der die Kraftwirkungen vermittelt. Damit war die zeitlos sich ausbreitende Kraft der älteren Elektrodynamik verworfen und ersetzt durch eine Wirkung, die von Punkt zu Punkt fortschreitet. Faraday selbst war nicht imstande, seine Vorstellungen mathematisch zu formulieren; das geschah durch Maxwell, dessen Gleichungssystem die neuere Elektrodynamik einleitet. Hier sind nun die ponderomotorischen Kräfte bestimmt durch die lokalen Zustandsgrößen, nämlich die Feldstärken im raumerfüllenden Medium; die Fernwirkungen sind ersetzt durch die Feldwirkungen. Gleichzeitig haben die aufeinander ponderomotorisch wirkenden Körper aufgehört, Sitz der Energie zu sein; dieser ist vielmehr nunmehr zu suchen in dem Raum zwischen den Körpern, der das elektrische und magnetische Feld und den ihm entsprechenden Spannungszustand enthält.

In neuester Zeit scheint die Entwickelung eine Auffassung zu bevorzugen, die den Raum zwischen den ponderablen Körpern, soweit er nicht vom elektromagnetischen Feld erfüllt ist, als wirklich leer betrachtet, die also einen stoffartigen raumerfüllenden Aether leugnet. Immerhin bleiben auch dann die elektrodynamischen Wirkungen noch Nahewirkungen, die von Punkt zu Punkt fortschreiten und deren Energie ihren Sitz im ganzen elektromagnetischen Feld hat.

2. Gesetz von Coulomb, elektrostatisches und magnetisches Feld, Potential. Das Gesetz, nach dem ruhende Elektrizitäten, anziehend und abstoßend, aufeinander wirken, fand Coulomb 1785; seine mit der Drehwage angestellten Versuche, bei denen sowohl der Abstand r der aufeinander wirkenden geladenen Metallkugeln, als auch (durch Berührung mit ungeladenen Kugeln) deren Ladungen e_1 und e_2 variiert wurden, lieferten lineare Abhängigkeit der abstoßenden Kraft F von den Ladungsmengen und das Gesetz vom umgekehrten Entfernungsquadrat. Wählt man für die Einheit der Elektrizitätsmenge diejenige, die im leeren Raum auf eine gleich große, im Abstand 1 cm befindliche die Kraft von einer Dyne ausübt (elektrostatisches Maßsystem), so wird hiernach im leeren Raum

$$F = \frac{e_1 e_2}{r^2}.$$

Die Versuche von Faraday ließen erkennen, daß bei unveränderten Ladungsmengen die Kraft F von der Natur des den Raum zwischen den geladenen Körpern erfüllenden Mediums (Dielektrikum) abhängt; F ergibt sich im allgemeinen kleiner als im leeren Raum, nämlich nur als das $1/\varepsilon$-fache, wo ε die Dielektrizitätskonstante des Mediums ist. Folglich wird allgemein

$$F = \frac{1}{\varepsilon}\frac{e_1 e_2}{r^2}.$$

In dem Raum nun in der Umgebung elektrisch geladener Körper erfährt demnach ein elektrisch geladenes Kügelchen Kraftantriebe; er stellt ein elektrostatisches Feld dar, dessen „Feldstärke" oder „elektrische Kraft" $\mathfrak{E}$ an jeder Stelle durch den Kraftantrieb auszudrücken ist, der auf eine dort befindliche Einheitsladung ausgeübt werden würde. Eine tatsächlich an jener Stelle befindliche Ladung e erfährt dann die Kraft $F = e\mathfrak{E}$; man erkennt also, daß die Ladung e_1 im Abstand r die Feldstärke hervorruft $\mathfrak{E} = \frac{1}{\varepsilon}\frac{e_1}{r^2}$, falls der ganze Raum die Dielektrizitätskonstante ε besitzt.

Die Feldstärke $\mathfrak{E}$ eines elektrostatischen Feldes läßt sich nun stets durch ein (skalares) elektrostatisches Potential φ ausdrücken, derart, daß z. B. die Komponente der elektrischen Kraft in der X-Richtung wird $\mathfrak{E}_x = -\frac{\partial\varphi}{\partial x}$. Für dieses Potential ergibt sich der Wert $\varphi = \frac{1}{\varepsilon}\int\frac{dS\varrho}{r}$, wo das Integral zu erstrecken ist über alle Raumelemente dS, in welchen die elektrische Dichte ϱ besteht und die vom betrachteten Aufpunkt die Entfernung r besitzen; hierbei ist vorausgesetzt, daß der ganze Raum erfüllt ist mit einer Substanz der Dielektrizitätskonstante ε.

Man überzeugt sich leicht, daß die angeschriebenen Gleichungen das Coulombsche Gesetz enthalten. Denn nach ihnen ist die Kraft, die von der Ladung e_2 auf die Ladung e_1 ausgeübt wird, $F = e_1\mathfrak{E}_1$, während die Feldstärke am Orte von e_1 sich ergibt zu $\mathfrak{E}_1 = -\frac{\partial\varphi}{\partial r} = -\frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{1}{\varepsilon}\frac{e_2}{r}\right)$, da $\int dS\varrho = e_2$; Ausführung der Differentiation liefert $\mathfrak{E}_1 = \frac{1}{\varepsilon}\frac{e_2}{r^2}$, so daß $F = \frac{1}{\varepsilon}\frac{e_1 e_2}{r^2}$ in Uebereinstimmung mit obigem.

Dieselben Beziehungen wie für die Kräfte zwischen Elektrizitätsmengen gelten für diejenigen zwischen Magnetpolen. Sind deren Stärken (magnetische Mengen) m_1 und m_2, so ist die gegenseitige Kraft, falls zwischen ihnen sich der leere Raum befindet

$$K = \frac{m_1 m_2}{r^2}.$$

Als Einheit der magnetischen Menge (Einheitspol) wird somit diejenige zu definieren sein, die im leeren Raum auf die gleich große im Abstande 1 cm die Kraft 1 Dyne ausübt (magnetisches Maßsystem, Gauß 1841). Auch hier ist, falls der Raum zwischen den aufeinander wirkenden Polen mit Materie erfüllt ist, die Kraft im allgemeinen kleiner als im leeren Raum, nämlich das $\frac{1}{\mu}$-fache, wo μ die Permeabilität des Zwischenmediums. Folglich ist allgemein

$$K = \frac{1}{\mu}\frac{m_1 m_2}{r^2}$$

und die analog der elektrischen definierte magnetische Kraft oder Feldstärke $\mathfrak{H}$ läßt sich, soweit sie von magnetischen Mengen herrührt, ausdrücken durch ein skalares Potential von der Form

$$\varphi = \frac{1}{\mu}\int\frac{dS\chi}{r}$$

wo χ die Dichte der freien magnetischen Menge bedeutet.

3. Oersted, Biot und Savart, elektromagnetisches Strommaß, magnetisches Feld elektrischer Ströme, Vektorpotential. Im Jahre 1820 entdeckte Oersted die Ablenkung der Magnetnadel durch den elektrischen Strom; noch im selben Jahre gelang es Biot und Savart, quantitative Untersuchungen über die Wirkung eines (praktisch) unendlich langen stromdurchflossenen Drahtes auf eine Magnetnadel zur Ableitung eines Elementargesetzes auszunutzen, nach welchem die Wirkung eines Stromelementes auf einen Magnetpol (bei gegebener Pol- und Stromstärke) umgekehrt proportional ist dem Quadrat des Abstandes r des Pols vom Stromelement ds und proportional dessen Länge sowie dem Sinus des Winkels zwischen r und ds, daß also diese Wirkung, soweit die geometrischen Verhältnisse in Betracht kommen, dargestellt wird durch den Ausdruck $\frac{\sin(ds, r)}{r^2}$ ds. Diese Wirkung steht senkrecht auf der Ebene (ds, r), und zwar wird ihr Sinn als eine auf den Nordpol der Magnetnadel ausgeübte Kraft (magnetische Feldstärke) durch die bekannte, von Ampère gefundene Schwimmerregel angegeben: Denkt man sich im Stromelement schwimmend, so daß der positive Strom beim Kopf austritt, und schaut die Magnetnadel an, so wird deren Nordpol nach links getrieben.

Aus dem genannten Elementargesetz er-

Digitized by Google

gibt sich die von **Biot** und **Savart** experimentell festgestellte Tatsache, daß die Direktionskraft, welche ein vertikaler, unendlich langer Strom auf eine in horizontaler Ebene schwingende kleine Magnetnadel ausübt, umgekehrt proportional dem Abstand der Nadel vom Draht ist; ferner ergibt sich aus ihm, daß die magnetische Feldstärke, die ein Kreisstrom vom Radius R in seinem Mittelpunkt erzeugt, da hier $r = R = \text{const.}$ und $\sphericalangle (ds, r) = \text{const.} = 90^0$ ist, proportional $\frac{2R\pi}{R^2} = \frac{2\pi}{R}$ wird. Diese magnetische Feldstärke steht senkrecht auf der Ebene des Kreises und ist dem Umlaufssinn des positiven Stroms so zugeordnet, wie die Verschiebungsrichtung einer rechtsgängigen Schraube ihrem Drehsinn.

Die Integration des Elementargesetzes von **Biot** und **Savart** liefert also den Einfluß, den die Konfiguration irgendeines linearen Stromes auf die magnetische Feldstärke in einem beliebigen Punkt ausübt. Da nun die magnetische Feldstärke bereits definiert ist, so kann man das Gesetz von **Biot** und **Savart** zur Festlegung eines Maßes für die Stromstärke benutzen. Man wird also diejenige Stromstärke die n-fache nennen, die an irgendeinem Punkt das n-fache Feld erzeugt wie der Strom 1; und weiter diejenige Stromstärke 1, welche, ein Drahtstück von 1 cm Länge durchfließend, in dem (großen) senkrecht zur Richtung des Drahtstückes aufgetragenen Abstand r das magnetische Feld $\frac{1}{r^2}$ entwickelt; oder welche, einen Drahtkreis vom Halbmesser R durchfließend, in dessen Mittelpunkt die magnetische Kraft $\frac{2\pi}{R}$ erzeugt. Die so definierte Stromeinheit ist die „elektromagnetische" (**W. Weber**, 1842); die praktische Stromeinheit 1 Ampere ist der zehnte Teil jener.

Unter Benutzung der so definierten Stromstärke kann man somit das magnetische Feld quantitativ berechnen, das irgendein geschlossener Strom i erzeugt. Die Addition der unendlich kleinen Beträge $\frac{i ds}{r^2} \sin (ds, r)$ hat natürlich, da es sich um Kräfte handelt, nach dem Parallelogrammgesetz, also vektoriell zu erfolgen; daher läßt sich die Feldstärke am bequemsten in der Schreibweise der Vektorrechnung (vgl. den Artikel „**Physikalische Größen**") angeben: $\mathfrak{H} = i \int_s \frac{1}{r^3} [d\mathfrak{s}\, \mathfrak{r}]$, wo das Integral über den geschlossenen Stromweg s zu nehmen ist.[1]) Wichtig ist ferner die Darstellung der Feldstärke durch eine besondere Funktion, nämlich einen Vektor $\mathfrak{A}$ mit den Komponenten

$$\mathfrak{A}_x = i \int_s \frac{dx}{r},\ \mathfrak{A}_y = i \int_s \frac{dy}{r},\ \mathfrak{A}_z = i \int_s \frac{dz}{r}$$

wo dx, dy, dz die Komponenten des Elementes $d\mathfrak{s}$ sind und die Integrale über den ganzen Stromweg zu erstrecken sind. Dann werden die Komponenten der magnetischen Feldstärke am betrachteten Punkt

$$\mathfrak{H}_x = \frac{\partial \mathfrak{A}z}{\partial y} - \frac{\partial \mathfrak{A}y}{\partial z},\ \mathfrak{H}_y = \frac{\partial \mathfrak{A}x}{\partial z} - \frac{\partial \mathfrak{A}z}{\partial x},$$

$$\mathfrak{H}_z = \frac{\partial \mathfrak{A}y}{\partial x} - \frac{\partial \mathfrak{A}x}{\partial y}$$

oder in vektorieller Schreibweise:

$$\mathfrak{A} = i \int \frac{d\mathfrak{s}}{r},\ \mathfrak{H} = \text{rot}\, \mathfrak{A}.$$

Diese Funktion heißt das **Vektorpotential** des linearen geschlossenen Stroms.

Endlich läßt sich die magnetische Kraft des durch ein beliebiges Stromsystem erzeugten Magnetfeldes mit den erzeugenden Stromstärken in eine dritte Beziehung bringen, der besondere Bedeutung zukommt. Denkt man sich um einen geraden Stromleiter mit der Stromstärke i einen mit dem Leiter konzentrischen Kreis gelegt, dessen Ebene auf der Strombahn senkrecht steht, so herrscht an allen Stellen dieses Kreises die tangentiale Feldstärke $H = \frac{2i}{r}$, wenn r den Radius des Kreises bedeutet. Es wirkt also auf den Magnetpol 1 überall diese Kraft $\frac{2i}{r}$, so daß der Einheitspol beim einmaligen Durchlaufen des Kreises die Arbeit $\frac{2i}{r} 2\pi r = 4\pi i$ leistet. Diese Arbeit, also die Größe $\int \mathfrak{H} dl$, genommen über den ganzen Kreis l, heißt das Linienintegral der magnetischen Kraft für diesen geschlossenen Weg. Dieser Arbeitsbetrag wird nun nicht anders, wenn die Bahn, für die das Linienintegral $\int \mathfrak{H}_l\, dl$ gebildet wird ($\mathfrak{H}_l$ ist dann die Komponente von $\mathfrak{H}$ in der Richtung dl), eine beliebige, den Strom einmal umschlingende geschlossene Kurve ist. Ja, für den ganz allgemeinen Fall, daß das Magnetfeld durch beliebig verteilte, gerad- oder krummlinige, lineare oder körperliche Ströme hervorgerufen wird, behält das Linienintegral der magnetischen Kraft, erstreckt über eine beliebige geschlossene Bahn, den Betrag $4\pi i$, wenn i die gesamte Stromstärke be-

[1]) Hiernach läßt sich z. B. berechnen, daß ein Strom i, der eine ebene Fläche f umkreist, in seiner entfernteren Umgebung dasselbe magnetische Feld hervorruft wie ein Magnet vom Moment $M = if$, dessen magnetische Achse auf f senkrecht steht.

Digitized by Google

deutet, welche eine beliebige, von der geschlossenen Kurve umrandete Fläche durchsetzt.

Als Reaktion der vom Stromelement i ds auf den Magnetpol m ausgeübten Kraft greift an ds eine Kraft vom selben Betrag $\frac{m\,i\,ds}{r^2}\sin(ds, r)$ an, die ebenfalls auf der Ebene (ds, r) senkrecht steht, aber die entgegengestezte Richtung hat wie jene. Nun erzeugt der Magnetpol am Ort des Stromelements die radial gerichtete Feldstärke $\mathfrak{H} = \frac{m}{r^2}$, falls der ganze Raum die Permeabilität 1 besitzt; es läßt sich deshalb für diesen Fall die Wirkung auf das Stromelement darstellen durch den Ausdruck $\mathfrak{H}\,i\,ds\,\sin(\mathfrak{H}ds)$. Da es nach der Feldwirkungstheorie gleichgültig ist, wodurch das Feld $\mathfrak{H}$ hervorgerufen wird, so muß auf das im Magnetfeld befindliche Stromelement stets eine Kraft ausgeübt werden, die senkrecht steht auf der durch das Element und die an seinem Ort herrschende Feldrichtung gelegte Ebene, und deren Sinn (wenn zunächst der Winkel ($\mathfrak{H}$ds) ein rechter ist) durch die „Linkehandregel" gegeben ist: hält man die 3 ersten Finger der linken Hand so, daß sie ein rechtwinkeliges Koordinatensystem bilden, und weist der Mittelfinger in die Richtung des Stromes, der Zeigefinger in die Richtung der magnetischen Feldstärke, so gibt der Daumen den Sinn der am Element angreifenden Kraft an. Ist der Winkel ($\mathfrak{H}$ds) ein anderer, so wird der Sinn der Kraft durch dieselbe Regel angegeben, wenn man sich das Stromelement auf die in der Ebene ($\mathfrak{H}$ds) liegende, zu $\mathfrak{H}$ senkrechte Richtung projiziert denkt.

Besitzt der Raum, in dem sich Stromelement und Magnetpol befinden, die Permeabilität μ, so wird die Wirkung des Elements auf den Pol (wenigstens für den hier stets angenommenen einfachsten Fall, daß der ganze Raum dasselbe μ aufweist) nicht geändert, weil die durch den Strom hervorgerufene Feldstärke unabhängig von der Permeabilität ist. Folglich muß auch, bei gegebener Polstärke m, die auf ds ausgeübte Kraft von μ unabhängig sein; da aber der Pol m am Ort des Elements allgemein das Feld $\mathfrak{H} = \frac{1}{\mu}\frac{m}{r^2}$ erzeugt, seine Polstärke also für gegebenes $\mathfrak{H}$ um so größer sein muß, je größer μ ist, so muß für den allgemeinen Fall der Ausdruck für die Kraftwirkung lauten: $\mu\mathfrak{H}\,i\,ds\,\sin(\mathfrak{H}ds)$.

Das Biot-Savartsche Gesetz, ergänzt durch die zuletzt besprochene Umkehrung, liefert uns bereits das Mittel, die elektrodynamische Wirkung zweier linearer, stationärer, geschlossener Stromkreise aufeinander zu berechnen.

4. Ampères Grundgesetz, elektrodynamische Apparate, elektrodynamische Stromeinheit, elektrodynamisches Potential. Ampère (1822) geht von der Anschauung aus, daß die Wirkungen von geschlossenen Stromkreisen durch Integration der Elementarwirkungen, die je 2 Stromelemente anziehend oder abstoßend aufeinander ausüben, darstellbar sein müsse; erscheint uns auch heute diese Auffassung dem Wesen des Vorganges nicht angemessen, so muß doch betont werden, daß das Ampèresche Gesetz für stationäre Stromkreise tatsächlich zu richtigen Resultaten führt.

An die Spitze seiner Betrachtungen stellt Ampère die der damaligen Physik naheliegende Annahme, daß zwei Stromelemente mit einer in die Verbindungslinie der beiden Elemente fallenden Kraft aufeinander wirken, die proportional ist den Längen ds_1 und ds_2 der Elemente, den in ihnen fließenden Strömen i_1 und i_2, und umgekehrt proportional irgendeiner noch unbekannten Potenz der Entfernung beider Elemente. Dazu tritt dann noch der Einfluß, den die Richtung beider Elemente gegeneinander auf die Kraftwirkung ausübt. Aus einigen (zum Teil allerdings im Sinne der Ampèreschen Deutung wenig beweiskräftigen) experimentellen Tatsachen gelingt es Ampère, die in der allgemeinen Formel zunächst noch vorkommenden Unbekannten zahlenmäßig zu ermitteln, und so entstehen schließlich die folgenden äquivalenten Formen des Ampèreschen Elementargesetzes für die Wirkung zweier Stromelemente aufeinander

$$f = -\frac{i_1 i_2 ds_1 ds_2}{r^2}\left(\cos\varepsilon - {}^3/_2 \cos\vartheta_1 \cos\vartheta_2\right)$$

$$= -\frac{i_1 i_2 ds_1 ds_2}{r^2}\left(\sin\vartheta_1 \sin\vartheta_2 \cos\eta - {}^1/_2 \cos\vartheta_1 \cos\vartheta_2\right)$$

$$= +\frac{i_1 i_2 ds_1 ds_2}{\sqrt{r}}\frac{\partial}{\partial s_2}\left(\frac{1}{\sqrt{r}}\frac{\partial r}{\partial s_1}\right)$$

Hierin bedeuten ϑ_1 und ϑ_2 die Winkel (ds_1r) und (ds_2r), ε den Winkel ($ds_1 ds_2$) und η den Winkel zwischen den Ebenen (ds_1r) und (ds_2r), ein negatives f bedeutet Anziehung, positives Abstoßung.

Aus diesem Gesetz leitet Ampère die Wirkung ab, die ein geschlossener Stromkreis auf ein Stromelement ausübt. Diese Wirkung läßt sich besonders einfach darstellen durch Einführung eines Vektors $\mathfrak{D}$, den Ampère Direktrix nennt (und der nichts anderes ist als die magnetische Feldstärke, die der vom [elektromagnetisch gemessen!] Strom 1 durchflossene geschlossene Stromkreis am Ort des Stromelements erzeugt). Die Wirkung auf das Stromelement

Digitized by Google

ergibt sich dann als senkrecht stehend sowohl auf der Direktrix als dem Element und hat den Betrag $F = \frac{1}{2} i_1 i_2 ds_2 \mathfrak{D} \sin(ds_2\mathfrak{D})$; also wenn man gemäß dem eben Gesagten (vgl. auch das weiter unten über die elektrodynamische Stromeinheit Gesagte) $\frac{i_1}{\sqrt{2}} \mathfrak{D} = \mathfrak{H} =$ der vom geschlossenen Strom am Ort des Elements erzeugten Feldstärke setzt: $F = \frac{i_2}{\sqrt{2}} ds_2 \mathfrak{H} \sin(ds_2\mathfrak{H})$. Das ist aber derselbe Ausdruck, den die Umkehrung des Biot-Savartschen Gesetzes (nach Einführung der elektrodynamisch gemessenen Stromstärke) für den Raum von der Permeabilität 1 liefert.

Durch weitere Integration ergeben sich die (der Beobachtung allein zugänglichen) Kräfte, mit denen geschlossene Stromkreise aufeinander wirken. Dabei lassen sich die bekannten elektrodynamischen Grunderscheinungen leicht errechnen: daß zwei parallele Kreisströme einander anziehen oder abstoßen, wenn sie im gleichen oder entgegengesetzten Sinn von Strom durchflossen werden; daß gekreuzte Kreisströme sich derart einander parallel zu stellen suchen, daß die Stromrichtung in beiden gleichsinnig wird, usw. Diese und andere Wirkungen lassen sich mit Apparaten untersuchen, die einen Teil eines Stromkreises beweglich machen. Solche Apparate wurden zuerst von Ampère konstruiert, später vielfach modifiziert. Zu quantitativen Untersuchungen wurden Elektrodynamometer (s. unten) und endlich elektodynamische Stromwagen, die auf der am Wagebalken erfolgenden Messung von Kräften und Drehmomenten beruhen (älteste von Cazin und fast gleichzeitig von Joule 1864, zu exakten absoluten Messungen geeignete nach Angaben von Helmholtz von Kahle 1896 konstruiert), mehrfach benutzt.

Eine quantitative Prüfung des Ampèreschen Gesetzes hat zuerst W. Weber vorgenommen. Er bediente sich des von ihm für diesen Zweck konstruierten Elektrodynamometers, bestehend aus 2 Spulen, einer festen und einer mit bifilarer Aufhängung um eine vertikale Achse drehbaren. Die Ebene der einen Spule geht durch die Mitte der anderen und steht senkrecht auf deren Ebene; je nachdem, ob die erstere oder die letztere die bewegliche ist (I. und II. Hauptlage), wirkt auf diese ein vermittels der bifilaren Aufhängung meßbares Drehmoment, das sich aus dem Ampèreschen Gesetz zu $\frac{i_1 i_2 f_1 f_2}{R^3}$ bezw. $\frac{1}{2} \frac{i_1 i_2 f_1 f_2}{R^3}$ berechnet (f_1 und f_2 die Spulenflächen), falls der Abstand R der Spulen voneinander gegen die Spulendimensionen sehr groß ist. Ist diese Bedingung nicht erfüllt, dann werden die Formeln komplizierter. Weber fand bei seinen Messungen Drehmomente, die mit den aus dem Ampèreschen Gesetz berechneten gut übereinstimmten.

Läßt man beide Spulen vom selben Strom i durchfließen, so wirkt in der ersten Lage auf die bewegliche Spule ein Drehmoment vom Betrag $i_2 \frac{f_1 f_2}{R^3}$; mißt man dieses Drehmoment in g.cm, so gelangt man für die Stromstärke zu der „Ampèreschen elektrodynamischen Einheit"; mißt man es aber in Einheiten des cgs-Systems, also in Dynen.cm, so erhält man die „absolute elektrodynamische Stromeinheit", welche, die Fläche von 1 cm² umkreisend, seitens eines eben solchen aus dem großen Abstand R in der ersten Lage wirkenden Kreisstromes das Drehmoment $\frac{1}{R^3}$ Dynen.cm erfährt.

Da ein solcher Kreisstrom in die Ferne wie ein Magnet wirkt, dessen Moment M gleich dem Produkt aus Fläche f und der elektromagnetisch gemessenen Stromstärke i ist, und da ein Magnet vom Moment M_1 auf einen anderen vom Moment M_2 aus erster Hauptlage das Drehmoment $\frac{2M_1M_2}{R^3}$ ausübt, so wird das Drehmoment der festen auf die bewegliche Spule durch $2i^2 \frac{f_1 f_2}{R^3}$ wiedergegeben, wenn die in beiden Spulen fließende Stromstärke i im elektromagnetischen Maß gemessen ist. Sind nun die Stromstärken, einmal elektrodynamisch (i_d), das anderemal elektromagnetisch (i_m) gemessen, tatsächlich dieselben, also auch die Drehmomente, so ergibt sich

$$i_d^2 = 2 i_m^2, \text{ oder } i_d = \sqrt{2} i_m;$$

d. h. wird ein Strom im elektrodynamischen Maß gemessen, so fällt die Maßzahl $\sqrt{2}$ mal so groß aus als wenn er im elektromagnetischen Maß gemessen wird; folglich ist die elektromagnetische Einheit der Stromstärke das $\sqrt{2}$-fache der elektrodynamischen.

Von Interesse sind noch die von Ampère aus seinem Grundgesetz berechneten Wirkungen von Solenoiden auf Stromelemente und aufeinander. Unter einem Solenoid versteht Ampère eine Reihe dicht aneinander geschichteter sehr kleiner Kreisströme, deren Ebenen senkrecht zu der ihre Mittelpunkte verbindenden Linie stehen. Besitzt der Anfang des Solenoids vom Stromelement den Abstand r, während das Ende sich ins Unendliche erstreckt, ist die überall konstante und im selben Sinn umlaufende Stromstärke der Kreisströme i_1, die im Element i_2 (beide elektromagnetisch gemessen), ist die Fläche der Kreisströme

Digitized by Google

überall f und kommen deren n auf die Längeneinheit, dann ist die auf ds ausgeübte, auf der Ebene (ds, r) senkrecht stehende Kraft $\frac{i_1 n f i_2 ds}{r^2} \sin(ds, r)$.

Man erkennt also, daß der im Endlichen liegende Solenoidpol ganz dieselbe Wirkung ausübt wie eine an seinem Ort befindliche magnetische Menge $i_1 nf$ (nordmagnetisch, wenn vom Ende aus gesehen die Kreisströme entgegen dem Uhrzeigersinn fließen), daß er also ein radiales Magnetfeld erzeugt, dessen Stärke im Abstand r den Betrag $\frac{i_1 nf}{r^2}$ besitzt. Liegt auch der zweite Pol im Endlichen, so wirkt er wie die entgegengesetzte magnetische Menge vom gleichen Betrag; hiernach sind die erzeugten Felder und die auftretenden Kraftwirkungen leicht zu berechnen.

Die wechselseitigen elektrodynamischen Wirkungen zweier geschlossener Stromkreise 1 und 2, wie sie z. B. aus dem Ampèreschen Grundgesetz berechnet werden können, haben natürlich zur Folge, daß mit irgendwelchen Konfigurationsänderungen dieser beiden Stromsysteme Arbeitsleistung verbunden ist. Wir verdanken F. Neumann (1845) den wichtigen Nachweis, daß diese Arbeitsbeträge darstellbar sind durch die Abnahme einer von der gegenseitigen Lage beider Stromkreise abhängigen Funktion Φ, der demnach die Bedeutung eines Potentials zukommt (Neumanns elektrodynamisches Potential). Für lineare stationäre Stromkreise, in denen also die (elektromagnetisch gemessen!) Stromstärken i_1 und i_2 auch trotz den bei der Bewegung auftretenden Induktionswirkungen merklich konstant bleiben (z. B. dadurch, daß die Stromkreise mit hoher elektromotorischer Kraft und großem Widerstand ausgerüstet sind), lautet diese Funktion

$$\Phi = -i_1 i_2 \int_{s_1}\int_{s_2} \frac{\cos(ds_1 ds_2)}{r} ds_1 ds_2.$$

Das Doppelintegral ist also zu erstrecken über jede mögliche Kombination von Leiterelementen einerseits des Stromkreises 1, andererseits des Kreises 2. Für irgendeine Relativlage der beiden Stromkreise zueinander stellt Φ die Arbeit dar, die aufzuwenden ist, damit die beiden Stromkreise entgegen den elektrodynamischen Kräften aus unendlichem Abstand in die betreffende Lage gebracht werden; und die Verschiebung der beiden Stromkreise aus der Relativlage a in die Relativlage b liefert seitens der elektrodynamischen Kräfte die Arbeit $\Phi_a - \Phi_b$, gleichgültig, auf welchem Weg diese Verschiebung erfolgt.

Durch einen analogen Potentialausdruck lassen sich auch die Arbeiten darstellen, welche bei der Deformation eines Stromkreises die von seinen verschiedenen Elementen aufeinander ausgeübten elektrodynamischen Kräfte ausüben. Dieses „elektrodynamische Selbstpotential" muß den Wert haben

$$\Phi_s = -\frac{1}{2} i^2 \iint \frac{\cos(ds\, ds')}{r} ds ds'$$

(da bei der Integralbildung alle Elementenkombinationen derselben Stromkurve zweimal berücksichtigt wurden, ist der Faktor ½ vor dem Integralzeichen notwendig). Φ_s stellt dann diejenige Arbeit dar, die in dem System in Form mechanischer Energie angehäuft ist. Nach der Feldwirkungstheorie ist aber der Energieinhalt des Systems durch die Energie des von ihm erzeugten magnetischen Feldes gegeben, und diese ist $\frac{1}{2} L i^2$, wo L der Selbstinduktionskoeffizient des Stromkreises ist. Somit ergibt sich

$$L = -\iint \frac{\cos(ds ds')}{r} ds ds'.$$

Betont sei, daß bei dieser letzten Integralbildung (und ebenso der für Φ_s) der Stromweg nicht mehr als linear betrachtet werden darf; dann kämen ja unendlich viele Elementenpaare ds ds' vor, für die das zugehörige r unendlich klein ist, so daß deren Einfluß das Doppelintegral stets unendlich groß machen würde; in der Tat wäre der Selbstinduktionskoeffizient eines Stromleiters, der bei unendlich kleinem Querschnitt einen endlichen Strom führte, unendlich groß. Man hat sich deshalb den Stromleiter in unendlich dünne Röhren zerlegt, d. h. den Strom als einen räumlichen zu denken; ist nun j die Stromdichte, $d\lambda$ und $d\lambda'$ Elemente von irgendwelchen dieser Stromröhren mit den Querschnitten dq und dq', so wird

$$\Phi_s = -\frac{1}{2} \iint \frac{j^2 dq dq'}{r} \cos(d\lambda d\lambda') d\lambda d\lambda'$$

und L durch die Gleichung definiert:

$$\Phi_s = \frac{1}{2} L J^2.$$

Ebenso wie den Selbstinduktionskoeffizienten aus dem elektrodynamischen Selbstpotential kann man den Koeffizienten der gegenseitigen Induktion aus dem gegenseitigen elektrodynamischen Potential erhalten. Somit ist

$$L_{12} = L_{21} = -\int_{s_1}\int_{s_2} \frac{\cos(ds_1 ds_2)}{r} ds_1 ds_2.$$

Hier dürfen natürlich beide Stromwege als streng linear betrachtet werden, solange nur ihre Querschnittdimensionen klein sind gegen die in Betracht zu ziehenden Entfernungen.

Digitized by Google

5. Grundgesetz von W. Weber. Verhältnis der elektromagnetischen zur elektrostatischen Stromeinheit. Das Webersche Gesetz sucht die elektrostatischen und elektrodynamischen Kraftwirkungen durch eine einheitliche Formel darzustellen. Zugrunde liegt die dualistische Anschauung, wonach im Leiter positive und negative Punktladungen sich mit entgegengesetzt gleicher Geschwindigkeit bewegen. Damit dann Anziehung und Abstoßung von in gerader Linie liegenden Stromelementen resultiere, muß zu der Coulombschen („ruhenden") Kraft ein Glied hinzugefügt werden, welches von der relativen Geschwindigkeit der bewegten Ladungen abhängt; und damit endlich parallele, entgegengesetzt gerichtete Stromelemente abstoßend aufeinander wirken, ist noch die relative Beschleunigung einzuführen. So ensteht, nachdem vorkommende Konstante durch Vergleich mit der Ampèreschen Elementarwirkung ermittelt worden sind, für die Kraft, die zwei Punktladungen aufeinander ausüben

$$F = \frac{e_1 e_2}{r^2}\left(1 - a^2\left(\frac{dr}{dt}\right)^2 + 2a^2 r \frac{d^2r}{dt^2}\right)$$

Hierin ist, wie man sieht, a das Reziproke einer Geschwindigkeit (da ja $a\frac{dr}{dt}$ eine absolute Zahl sein muß). Diese Geschwindigkeit hat in der Weberschen Auffassung eine bestimmte physikalische Bedeutung. Denkt man sich zwei elektrische Punktladungen in der Richtung ihrer Verbindungslinie mit der konstanten Relativgeschwindigkeit $1/a$ bewegt, so wird, da dann $\frac{d^2r}{dt^2} = 0$, offenbar $F = 0$; somit ist $1/a$ diejenige Relativgeschwindigkeit, die zwei Elektrizitätsmengen gegeneinander besitzen müssen, damit die elektrostatische Anziehung oder Abstoßung durch die elektrodynamische Wirkung gerade kompensiert wird.

Weber selbst hat gelegentlich der Vergleichung seines Gesetzes mit dem von Ampère darauf aufmerksam gemacht, daß die Geschwindigkeit $1/a$ zu dem Verhältnis der elektrodynamischen zur elektrostatischen Stromeinheit in einfacher Beziehung steht. In der Weberschen Auffassung ist nämlich die elektrodynamische Stromstärke gegeben durch $i_d = 4aeu$, wenn sich in der Längeneinheit des Drahts die Elektrizitätsmenge $+e$ mit der Geschwindigkeit u im einen Sinn und die Elektrizitätsmenge $-e$ mit derselben Geschwindigkeit im entgegengesetzten Sinn bewegt. Andererseits ist die elektrostatische Stromstärke auszudrücken durch $i_{st} = 2eu$, entsprechend einem Strömen der Elektrizitätsmenge 2e nach nur einer Richtung. Folglich wird das Verhältnis der Maßzahlen für einen und denselben Strom, einerseits gemessen in statischen, andererseits in elektrodynamischen Einheiten, $\frac{i_{st}}{i_d} = \frac{2}{4a} = \frac{1}{2a}$. Es ergibt sich also die elektrodynamische Stromeinheit $\frac{1}{2a}$ mal größer als die elektrostatische. Weber hat im Verein mit Kohlrausch 1856 diese Verhältniszahl experimentell ermittelt, indem er durch ein ballistisches Galvanometer eine elektrostatisch (aus Kapazität und Potential eines Kondensators) bekannte Elektrizitätsmenge entlud und andererseits denselben ballistischen Ausschlag durch Einwirkung eines elektrodynamisch gemessenen Stroms während einer bekannten kurzen Zeit hervorrief. Dabei ergab sich $\frac{1}{2a} = 2{,}2.10^{10}$ cm/sec, so daß die oben genannte kritische Geschwindigkeit $1/a = 4{,}4.10^{10}$ cm/sec wird.

Von weit größerer Bedeutung ist das Verhältnis c der elektromagnetischen zur elektrostatischen Stromeinheit. Da nach früherem für die Maßzahlen gilt: $\frac{i_d}{i_m} = \sqrt{2}$ so wird jenes Verhältnis $\frac{i_{st}}{i_m} = \frac{1}{\sqrt{2}a} = 3{,}1.10^{10}$ cm/sec. Diese Geschwindigkeit ist identisch mit der Lichtgeschwindigkeit; es ist einer der größten Erfolge der Maxwellschen Theorie gewesen, daß es ihr gelang, für die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichts das Verhältnis der elektromagnetischen zur elektrostatischen Stromeinheit zu liefern, also eine fundamentale Beziehung zu erklären, für die bis dahin kein Grund bekannt war.

6. Maxwells Theorie. 6a) Bedeutung und Grundlagen. Die ältere Elektrodynamik ist vollständig ausreichend zur Behandlung der stationären Stromsysteme, d. h. der geschlossenen Stromkreise, in denen die Stromstärke konstant ist; und zwar besitzt sie in solchen Fällen, obwohl sie in ihren Grundlagen lineare Ströme voraussetzt, auch für körperliche Ströme Gültigkeit, da solche stets in eine Reihe von parallelen linearen Strömen aufgelöst gedacht werden können. So sind denn insbesondere alle Probleme des Gleichstroms auf Grund der vormaxwellschen Elektrodynamik lösbar; ja, deren Gültigkeitsbereich geht noch viel weiter und umfaßt nicht nur die geschlossenen Wechselströme niedriger Frequenz (insbesondere z. B. technischen Wechselstrom), sondern auch die ungeschlossenen Ströme, wie sie in elektrischen Schwingungskreisen fließen, deren Kapazität auf genügend eng begrenzte Raumgebiete (z. B. Leydener Flasche) beschränkt ist, in denen also gewissermaßen die „Ungeschlossenheit" ge-

Digitized by Google

ringen Betrag besitzt. In allen diesen Fällen kommt die Frage, die die alte Elektrodynamik, da sie mit stationären Strömen arbeitet, nicht zu entscheiden vermag, die Frage nämlich, ob und mit welcher endlichen Geschwindigkeit sich die elektrodynamischen Wirkungen im umgebenden Raum verbreiten, gar nicht in Betracht; denn wenn die Aenderungen des Stroms genügend langsam geschehen, muß stets an jeder Stelle der Umgebung dasselbe magnetische Feld herrschen, wie es auch vorhanden sein würde, wenn die Strombahn von dem augenblicklichen Wert des Stroms konstant durchflossen wäre, oder mit anderen Worten dasjenige Feld, das sich bei unendlich großer Ausbreitungsgeschwindigkeit der magnetischen Wirkung ergeben würde. Solche Stromsysteme heißen „quasistationär"; tatsächlich gelang es schon W. Thomson (1853), auf Grund der älteren Auffassung, die Schwingungsdauer elektrischer Schwingungskreise mit diskret verteilter Selbstinduktion L und Kapazität C theoretisch abzuleiten und durch die bekannte Thomsonsche Formel $\tau = \frac{2\pi}{c}\sqrt{LC}$ darzustellen, die zuerst durch Feddersen (1859) geprüft und hinreichend genau befunden wurde.

Indes versagte die ältere Elektrodynamik, als Stromsysteme bekannt wurden, bei denen die „Ungeschlossenheit" erheblicher war, d. h. bei denen die Kapazität nicht mehr konzentriert war an engbegrenzten Stellen, deren Ausdehnung verschwand gegenüber den Dimensionen der ganzen Strombahn, sondern sich mehr oder weniger gleichmäßig über das ganze System verteilte; hier bedurfte die ältere Elektrodynamik einer fundamentalen Erweiterung. Denn nicht nur, daß diese Systeme in solchem Maß ungeschlossen waren, daß die in den Drähten fließenden Ströme in irgendeinem Augenblick an verschiedenen Stellen der Strombahn ganz verschieden waren, es war auch die zeitliche Aenderung des Stroms nun so groß, daß der Wert der Ausbreitungsgeschwindigkeit seiner magnetischen Wirkungen maßgebenden Einfluß auf das magnetische Feld an irgendeiner Stelle der Umgebung gewann. Mit solchen Stromsystemen hat zuerst Heinrich Hertz (1887) gearbeitet; und so sind es denn gerade seine Versuche gewesen, die der durch Maxwell erweiterten Elektrodynamik zum Sieg verholfen haben.

Die wesentliche Erweiterung, die Maxwell einführt, läßt sich als Hypothese der inkompressiblen Elektrizität bezeichnen. Während die ältere Auffassung ungeschlossene Ströme kennt, gibt es solche bei Maxwell nicht; es bedarf daher die ältere Auffassung einer Ergänzung in den Fällen, wo die gewöhnlichen Ströme der alten Elektrodynamik in Kondensatoren enden. Maxwell sucht diese Ergänzung in einer Veränderung des an die Kondensatorbelegung angrenzenden Dielektrikums. In diesem entsteht ja ein elektrisches Feld und dessen Erzeugung wird mit der Verschiebung von Elektrizität im Dielektrikum in Zusammenhang gebracht. So setzt sich denn der der Kondensatorplatte zufließende „Leitungsstrom" in das Dielektrikum hinein als „Verschiebungsstrom" fort, so daß nunmehr die Strombahn stets geschlossen ist und der Gesamtwert des Stroms in jedem Augenblick für alle Querschnitte des Stromsystems der gleiche ist. Hiernach finden die Vorgänge so statt, als ob eine den ganzen Raum durchdringende inkompressible Flüssigkeit „Elektrizität" sich bewege; eine solche Bewegung kann nur in geschlossenen Bahnen erfolgen.

Zu dieser Grundvorstellung tritt ergänzend hinzu die Annahme, daß der Gesamtstrom an der Ausbildung des magnetischen Feldes beteiligt ist, und zwar nach Gesetzen, wie sie für die nächste Umgebung der stromdurchflossenen Raumstelle sich nach den Prinzipien der alten Elektrodynamik berechnen lassen. Das hier auftretende magnetische Feld bewirkt nun seinerseits gemäß den Vorstellungen von Faraday eine elektrische Induktion, würde also in einem geschlosssenen Leiterkreis einen Induktionsstrom entstehen lassen und muß demgemäß im Dielektrikum einen in sich geschlossenen Verschiebungsstrom hervorrufen, der nach der Maxwellschen Auffassung identisch ist mit der Entstehung eines elektrischen Feldes. Die Folge ist die Ausbildung eines magnetischen Feldes in der nächsten Umgebung des neuen Gesamtstroms, das nun seinerseits wieder einen Strom hervorruft usf. So schreitet der durch das gleichzeitige Auftreten von elektrischen und magnetischen Kräften charakterisierte Vorgang von Punkt zu Punkt des Raumes fort mit einer endlichen Geschwindigkeit, die nur durch die elektrischen und magnetischen Eigenschaften des Raumes bestimmt wird.

Zur näheren Illustrierung möge der Vorgang genauer beschrieben werden, der nach dieser Auffassung in der Umgebung eines Drahtes sich abspielt, durch den plötzlich ein elektrischer Strom gesandt wird. Alsbald entwickelt sich in unmittelbarer Nähe des Drahtes ein magnetisches Feld, das den Draht wirbelartig umgibt; folglich tritt durch jede an der Drahtoberfläche gelegene kleine Fläche, deren Ebene durch die Drahtachse geht, ein wachsender magnetischer

Digitized by Google

Kraftlinienfluß, der gemäß dem weiter unten zu formulierenden Induktionsgesetz längs der Randlinie jener Fläche elektrische Kräfte erzeugt, die sich zusammenschließen einerseits zu einer elektrischen Kraft im Innern des Drahtes, welche dem Strom entgegengerichtet ist und die elektromotorische Kraft der Selbstinduktion ausmacht, andererseits zu einem den Draht zylindrisch umhüllenden elektrischen Feld, dessen Richtung dieselbe ist wie die des Drahtstroms. Diesem Feld entspricht ein Verschiebungsstrom, der nun in seiner unmittelbaren Umgebung nach außen hin einen magnetischen Wirbel entstehen läßt. Letzterer ruft nach der soeben angestellten Ueberlegung durch Induktion wieder zwei elektrische Felder hervor, von denen das eine jenes den magnetischen Wirbel erzeugende elektrische Feld vernichtet, das andere den Wirbel zylindrisch umhüllt und die Ausbildung eines weiteren Wirbels vorbereitet. So schreitet der ganze Vorgang als eine elektromagnetische Störung in die Umgebung hinein fort, bestehend aus sich gegenseitig bedingenden elektrischen und magnetischen Kräften, die aufeinander und auf der Ausbreitungsrichtung senkrecht stehen. Besonders sei darauf aufmerksam gemacht, daß der Ausbreitungsvorgang notwendig mit elektrischen Kräften auch dann verknüpft ist, wenn diese in dem schließlich stationär gewordenen Zustand gar nicht mehr vorhanden sind (wie es ja oben der Fall sein würde, wenn der benutzte Draht ein sehr gutes Leitvermögen besitzt). Analoges gilt für die Vorgänge bei der Ausbildung und Ausbreitung eines elektrostatischen Feldes: die dabei entstehenden Verschiebungsströme rufen magnetische Kräfte hervor, die aber alsbald wieder verschwinden, in ähnlicher Weise, wie es im soeben behandelten Fall die elektrischen Kräfte tun.

6b) Mathematische Formulierung; die Hauptgleichungen für ruhende, isotrope, homogene Medien. Das Wesen und der ganze Inhalt der Maxwellschen Theorie wird dargestellt durch ein System von Gleichungen, die sogenannten Hauptgleichungen. Die in diesen vorkommenden Größen sollen ausgedrückt werden in einem von H. A. Lorentz (Enzyklopädie der mathematischen Wissenschaften) verwendeten gemischt-elektrostatisch-elektromagnetischen Maßsystem, das mit dem von Maxwell benutzten nicht übereinstimmt, vor diesem aber den Vorzug hat, daß schon in der Gestalt der Gleichungen die Analogie der elektrischen und magnetischen Größen deutlicher erkennbar wird. Zu diesem Maßsystem gelangt man in der folgenden Weise. Läßt man die Wahl der Einheiten für elektrische und magnetische Mengen zunächst noch offen, so sind die Coulombschen Kräfte (vgl. Abschnitt 1) für den leeren Raum allgemeiner darzustellen durch

$$F = h\,\frac{e_1 e_2}{r^2} \text{ und } K = k\,\frac{m_1 m_2}{r^2}.$$

Durch die Wahl der Einheiten erst werden die Proportionalitätsfaktoren h und k bestimmt, derart, daß schließlich F und K in Dynen erscheinen. Bei dem in Abschnitt 1 verwendeten „elektrostatischen" System ist e so wie dort angegeben definiert und h wird 1; analog führt das „magnetische System" zu dem Wert von k gleich 1. Lorentz definiert nun die Einheiten so, daß h und k beide gleich $\frac{1}{4\pi}$ werden; eben diese besondere Definition bewirkt, wie weiter unten zu erkennen sein wird, die kurze Form der Hauptgleichungen.

Eine Folge der getroffenen Wahl ist, daß die elektrische Feldstärke, die im freien Aether durch eine Ladung e im Abstand r hervorgebracht wird, den Wert $\mathfrak{E} = \frac{1}{4\pi}\frac{e}{r^2}$ hat. Hiernach ist leicht zu berechnen, daß eine mit der Elektrizitätsmenge e pro Flächeneinheit gleichmäßig belegte, sehr ausgedehnte Ebene allenthalben im umgebenden Raum eine elektrische Kraft hervorruft, die, auf der Ebene senkrecht stehend, den Betrag $\frac{e}{2}$ besitzt; durchschreitet man also diese Ebene, so beobachtet man im ganzen eine Aenderung der elektrischen Kraft vom Betrag e. Man kann sich nun umgekehrt eine Aenderung der Feldstärke an irgendeinem Punkt des leeren Raumes vom Betrag $\Delta\mathfrak{E} = e$ hervorgerufen denken durch die Bewegung der erwähnten elektrisch belegten Ebene oder allgemein einer räumlich verteilten elektrischen Ladung, die nur derart entgegen der Richtung von $\Delta\mathfrak{E}$ bewegt werden muß, daß dabei die kleine, durch den betreffenden Punkt des Raums senkrecht zur Richtung der Bewegung gelegte Fläche df von der Elektrizitätsmenge edf durchströmt wird. Aendert sich also die elektrische Kraft in der Zeit dt um den Betrag $d\mathfrak{E}$, dann entspricht diese Aenderung einem Strom, dessen Dichte in dem hier verwendeten Maßsystem den Betrag $\frac{\partial\mathfrak{E}}{\partial t}$, also den elektrostatisch gemessenen Wert $\frac{1}{\sqrt{4\pi}}\frac{\partial\mathfrak{E}}{\partial t}$ oder den elektromagnetisch gemessenen Betrag $\frac{1}{\sqrt{4\pi}}\frac{1}{c}\frac{\partial\mathfrak{E}}{\partial t}$ hat (über die Bedeutung von c als das Verhältnis der elektromagnetischen zur elektrostatischen Stromeinheit

Digitized by Google

s. oben Abschnitt 5.) Dies ist der Ausdruck für den Maxwellschen Verschiebungsstrom im leeren Raum.

Ist aber die oben genannte elektrisch geladene Ebene nicht in den leeren Raum, sondern in ein Dielektrikum von der Dielektrizitätskonstante ε eingebettet, so wird die im umgebenden Raum hervorgerufene elektrische Kraft nicht $\frac{e}{2}$ sondern nur $\frac{1}{\varepsilon}\frac{e}{2}$. Das Feld $\frac{e}{2}$ wird vielmehr erst durch die Flächendichte εe erzeugt. Soll also die gleiche Aenderung der Feldstärke wie vorher geschehen, so muß die stärkere Ladung εe bewegt werden. Die Dichte des Verschiebungsstroms hat also jetzt den Betrag $\frac{\varepsilon}{\sqrt{4\pi}}\frac{\partial \mathfrak{E}}{\partial t}$ im elektrostatischen, $\frac{\varepsilon}{\sqrt{4\pi}}\frac{1}{c}\frac{\partial \mathfrak{E}}{\partial t}$ im elektromagnetischen Maß. Führt man eine neue Größe ein $\mathfrak{D} = \varepsilon\mathfrak{E}$, so wird der Verschiebungsstrom in unserem Maß $\frac{\partial \mathfrak{D}}{\partial t}$. Diese Größe $\mathfrak{D}$ heißt „dielektrische Verschiebung" oder (Lorentz) „elektrische Erregung"; sie charakterisiert denjenigen Zustand einer Raumstelle, der dort die elektrische Kraft $\mathfrak{E}$ hervorruft, ist somit im freien Aether mit $\mathfrak{E}$ identisch, in der Materie im allgemeinen aber größer (dielektrische Polarisation des Isolators, siehe die Theorie von Lorentz in Abschnitt 8).

Die erste Hauptgleichung der Maxwellschen Theorie bringt nun das magnetische Feld in Abhängigkeit von der elektrischen Strömung. Und zwar wird hier der schon früher in Abschnitt 3 formulierte Ausdruck für das Linienintegral der magnetischen Kraft, gebildet über die Randkurve irgendeiner Fläche, die von elektrischem Strom durchsetzt wird, allgemein angewandt auf die gesamte Strömung, die sich aus Leitungs- und Verschiebungsstrom zusammensetzt. Jenes Linienintegral lautete für die damals angewendeten Einheiten $\int \mathfrak{H}'_l\, dl = 4\pi i'$; hier war die magnetische Feldstärke $\mathfrak{H}'$ in den gewöhnlichen magnetischen Einheiten, i' in Einheiten des elektromagnetischen cgs-Systems ausgedrückt. In dem hier anzuwendenden System wird wegen $k = \frac{1}{4\pi}$ die Einheit der Feldstärke größer als im gewöhnlichen magnetischen System, nämlich gleich dem $\sqrt{4\pi}$-fachen; folglich erscheinen die Maßzahlen der Feldstärke $\mathfrak{H}'$ gleich dem $\sqrt{4\pi}$-fachen derjenigen Maßzahl, die dieses Feld in dem hier zu benutzenden System angibt: $\mathfrak{H}' = \sqrt{4\pi}\,\mathfrak{H}$. Drückt man ferner alle Ströme i in unserem durch $h = \frac{1}{4\pi}$ modifizierten elektrostatischen Maßsystem aus, beachtet also, daß die so definierte Stromeinheit gegenüber derjenigen des elektromagnetischen cgs-Systems reduziert ist, zunächst im Verhältnis $\frac{1}{c}$ der gewöhnlichen elektrostatischen zur elektromagnetischen Einheit, sodann im Verhältnis $\frac{1}{\sqrt{4\pi}}$ der hier verwendeten Ladungseinheit zur gewöhnlichen elektrostatischen, so ergibt sich, daß der in den genannten Ausdruck für das Linienintegral einzusetzende Strom i' gleich ist dem im hier benutzten Maß ausgedrückten Strom i, dividiert durch $c\sqrt{4\pi}$. Demnach wird die Gleichung für das Linienintegral

$$\sqrt{4\pi}\int \mathfrak{H}_l\, dl = \frac{4\pi i}{c\sqrt{4\pi}} \text{ oder } \int \mathfrak{H}_l\, dl = \frac{i}{c}.$$

Wird nun die Fläche σ, über deren Randkurve l das Linienintegral sich erstrecken soll, von einer Strömung durchsetzt, deren Dichte $\mathfrak{C}$ sei, so ergibt sich der von l umschlungene Strom zu $\int_\sigma \mathfrak{C}_n\, d\sigma$, wobei unter $\mathfrak{C}_n$ die auf $d\sigma$ senkrechte Komponente der Strömung $\mathfrak{C}$ verstanden ist. Folglich entsteht

$$\int_l \mathfrak{H}_l\, dl = \frac{1}{c}\int_\sigma C_n d\sigma.$$

Hierin setzt sich nun — und das ist ja die Erweiterung, die die Maxwellsche Theorie gegenüber der alten Elektrodynamik bringt — $\mathfrak{C}$ zusammen aus Leitungs- und Verschiebungsstrom. Die Dichte i des ersteren ist zu setzen $= \lambda\mathfrak{E}$, wo λ die Leitfähigkeit des Mediums ist ($\lambda = 4\pi c^2\lambda'$, wenn λ' die gewöhnliche Leitfähigkeit im elektromagnetischen Maß ist); die Dichte des Verschiebungsstroms war schon oben angegeben zu $\frac{\partial \mathfrak{D}}{\partial t} = \varepsilon\frac{\partial \mathfrak{E}}{\partial t}$, so daß sich für das Linienintegral ergibt

$$\int_l \mathfrak{H}_l\, dl = \frac{1}{c}\left(\int_\sigma i_n d\sigma + \varepsilon\frac{\partial}{\partial t}\int_\sigma \mathfrak{E}_n d\sigma\right)$$

(I. Hauptgleichung).

Die Frage, ob der Verschiebungsstrom tatsächlich die von Maxwell angenommene magnetische Wirkung habe, ist mehrfach in direkten Versuchen behandelt worden. Hertz hat gezeigt, daß die induzierende Wirkung, die ein elektrischer Oszillator auf einen in der Nähe aufgestellten Resonator ausübt, durch einen Klotz isolierenden Materials größerer Dielektrizitätskonstante in der Tat qualitativ so beeinflußt wird, wie es nach der Maxwellschen Theorie der Verschiebungsströme zu erwarten ist. Die unmittelbare magnetische Wirkung der Verschiebungsströme in einem Isolator hat zuerst Röntgen festgestellt; er ließ um eine vertikale Achse eine runde Ebonitplatte rotieren, über welcher eine feste, an Erde

Digitized by Google

gelegte Metallplatte lag, während unter ihr zwei durch einen Schlitz getrennte Metallplatten sich befanden, deren eine positiv, die andere negativ geladen werden konnten. Wenn nun die Ebonitscheibe rotierte, so traten die Teile, die die Schlitze passierten, aus einem aufwärts gerichteten in ein abwärts gerichtetes elektrostatisches Feld, wurden also hier umpolarisiert oder erfuhren Aenderungen des Vektors $\mathfrak{D}$. Diese nach Maxwell vertikalen Strömen äquivalenten Schwankungen von $\mathfrak{D}$ mußten über der oberen Metallplatte, in der Rotationsachse, ein magnetisches Feld erzeugen, das mit einer empfindlichen astasierten Magnetnadel gemäß der Erwartung wirklich festgestellt werden konnte. Später hat insbesondere Eichenwald die Röntgenschen Versuche wiederholt, und die magnetische Wirkung des Verschiebungsstroms nicht nur dem Sinne nach, sondern auch zahlenmäßig übereinstimmend gefunden mit der Wirkung des äquivalenten Leitungsstroms, wie er nach Maxwell zu berechnen ist. Es darf deshalb die Maxwellsche Annahme, soweit es sich um die magnetisierende Wirkung desjenigen Teils der Verschiebungsströme handelt, der von Aenderungen des elektrischen Feldes im materiellen Dielektrikum herrührt, als durch direkte Versuche bestätigt gelten; ob aber auch im freien Aether magnetisierend wirkende Verschiebungsströme möglich sind, bleibt hierbei unentschieden.

Die zweite Hauptgleichung von Maxwell, das Gegenstück und Komplement der ersten, ist nichts anderes als eine Verallgemeinerung des Faradayschen Induktionsgesetzes. Faraday war es schon gelungen, die Erscheinungen der elektrischen Induktion auszudrücken durch das Verhalten der magnetischen Kraftlinien, die dem induzierenden Stromkreis oder Magneten angehören. Diese magnetischen Kraftlinien, d. h. die Kurven, welche an jeder Stelle des Feldes die Richtung der dort herrschenden magnetischen Kraft angeben, besagen in der Faradayschen Auffassung weit mehr als nur diese geometrische Beziehung; ihre Dichte, d. h. die Zahl, welche die senkrecht zu ihnen stehende Fläche von 1 qcm durchsetzt, gibt die Stärke der magnetischen Kraft an der betreffenden Stelle an, sobald die Einheitskraftlinie in geeigneter Weise definiert ist. Ja, die Vorstellung Faradays, daß die Kraftlinien kontinuierliche Existenz hätten, daß sie also nicht plötzlich in Gebieten entstehen könnten, in denen vorher keine vorhanden waren, drückt klar aus, daß den Kraftlinien die physikalische Bedeutung eines besonderen Zustandes im Raum zukommt, der sich bei Aenderung des induzierenden Stroms usw. mit endlicher Geschwindigkeit im Raum ausbreitet. Im induzierten Stromkreis tritt nun nach Faraday nur dann eine elektromotorische Kraft durch Induktion auf, wenn entweder seine Drähte durch die Kraftlinien des Magnetfeldes hindurchbewegt werden oder wenn die Kraftlinien gezwungen sind, durch die Drähte hindurchzugehen, sei es durch Bewegung des induzierenden Systems oder durch Aenderung seines Magnetfeldes infolge von Stromänderung oder dgl. Es ist also stets das Schneiden der Kraftlinien, das in den Drähten des induzierten Stromkreises elektromotorische Kräfte hervorruft; und das Grundgesetz lautet (in der von Maxwell gegebenen strengen Form): „Die in der ganzen Ausdehnung eines Leiters zu einer bestimmten Zeit wirkende elektromotorische Kraft wird durch das Verhältnis, in dem die von ihm eingefaßten magnetischen Kraftlinien in der Zeiteinheit an Zahl gerade abnehmen, gemessen".

Ersichtlich gilt dieses Gesetz zunächst nur für geschlossene Leiterbahnen, in denen also gewöhnliche Leitungsströme fließen können; Maxwell erweitert seine Gültigkeit auf jede beliebige geschlossene Kurve, gleichviel, ob diese ganz oder teilweise in Leitern oder Isolatoren verläuft. Es ist daher jede Aenderung des magnetischen Kraftflusses durch irgendeine Fläche, d. i. der Gesamtzahl von Kraftlinien, die diese Fläche durchsetzen, stets begleitet von einem Induktionsstrom längs der Randkurve der Fläche; dieser Strom kann je nach Umständen Leitungsstrom oder Verschiebungsstrom oder beides zusammen sein. Und da ein Verschiebungsstrom identisch ist mit dem Auftreten bezw. der Aenderung des elektrischen Feldes an der betreffenden Stelle, so muß hiernach jede Aenderung in der Verteilung der magnetischen Kraft gleichzeitige Aenderungen der elektrischen Kraft zur Folge haben.

Die elektromotorische Kraft für eine geschlossene Kurve, d. i. die Arbeit, welche die Elektrizitätsmenge 1 beim einmaligen Durchlaufen der Kurve leistet, ist identisch mit dem Linienintegral der elektrischen Kraft über die ganze Kurve, also gleich $\int \mathfrak{E}_l \, dl$, wo $\mathfrak{E}_l$ die in die Richtung des Kurvenelements dl fallende Komponente von $\mathfrak{E}$ bedeutet. Andererseits ist der gesamte, die Fläche durchsetzende magnetische Kraftfluß gleich $\int \mathfrak{H}_n d\sigma$, falls das Medium, in dem sich σ befindet, die Permeabilität $\mu = 1$ besitzt (leerer Raum). Ist aber der Raum mit einem Medium von anderer Permeabilität erfüllt, so ist der gesamte Kraftfluß nicht durch den Vektor $\mathfrak{H}$ bestimmt, sondern durch einen anderen Vektor, die magnetische Induktion $\mathfrak{B}$, die mit $\mathfrak{H}$ durch die Beziehung verknüpft ist: $\mathfrak{B} = \mu \mathfrak{H}$ (wobei allerdings im allgemeinen μ keineswegs konstant, sondern, besonders bei stark magnetisierbaren

Digitized by Google

Medien, von $\mathfrak{H}$ abhängt). Folglich wird der Kraftfluß gleich $\int \mathfrak{B}_n d\sigma = \int \mu \mathfrak{H}_n d\sigma$, und die in der Zeiteinheit geschehende Abnahme dieses Kraftflusses, die ja gemäß dem Faradayschen Induktionsgesetz die elektromotorische Kraft bestimmt, gleich

$$-\frac{\partial}{\partial t}\int \mathfrak{B}_n d\sigma = -\frac{\partial}{\partial t}\,\mu \int \mathfrak{H}_n d\sigma.$$

Wegen der erforderlichen Umrechnung dieser elektromotorischen Kraft in das hier verwendete Maßsystem ist der gefundene Ausdruck noch mit $\frac{1}{c}$ zu multiplizieren; so entsteht denn

$$\int_l \mathfrak{E}_l\, dl = -\frac{\mu}{c}\frac{\partial}{\partial t}\int_\sigma \mathfrak{H}_n d\sigma. \quad \text{(II. Hauptgleichung).}$$

Um die Analogie der physikalischen Vorgänge, die den beiden Hauptgleichungen entsprechen, deutlicher hervortreten zu lassen, sei darauf hingewiesen, daß man die Aenderung des Kraftflusses durch σ hindurch, d. h. die Aenderung der magnetischen Kraft in σ, sich herbeigeführt denken kann durch die Bewegung einer im Raum verteilten freien nordmagnetischen Menge in ähnlicher Weise, wie oben die Aenderung der elektrischen Feldstärke mit der Bewegung im Raum verteilter freier Elektrizität in Beziehung gebracht wurde. Die Aenderung des magnetischen Kraftflusses durch σ entspricht also dem dielektrischen Verschiebungsstrom; und ebenso wie dieser durch die Dielektrizitätskonstante beeinflußt wird, so muß der magnetische Verschiebungsstrom von der magnetischen Permeabilität abhängen. Völlig analog würden die den beiden Hauptgleichungen entsprechenden Vorgänge dann sein, wenn es außer den magnetischen Verschiebungsströmen auch magnetische Leitungsströme gäbe; das würde zur Voraussetzung haben, daß sich überhaupt nord- und südmagnetische Mengen trennen lassen. Dies ist bekanntlich nicht der Fall, denn jedes magnetisierte Raumelement besitzt stets sowohl seinen Nord- wie seinen Südpol. Für den Fall elektrischer Leiter sind daher die Hauptgleichungen nicht symmetrisch; doch werden sie das, wenn es sich um Vorgänge in Isolatoren handelt; dann nehmen die Gleichungen die Form an

$$\int_l \mathfrak{H}_l\, dl = \frac{\varepsilon}{c}\frac{\partial}{\partial t}\int_\sigma \mathfrak{E}_n d\sigma$$

und
$$\int_l \mathfrak{E}_l\, dl = -\frac{\mu}{c}\frac{\partial}{\partial t}\int_\sigma \mathfrak{H}_n d\sigma.$$

Es liegt nahe, die Forderung der Maxwellschen Theorie, daß magnetische Verschiebungsströme elektrische Felder hervorrufen müssen, durch direkte Versuche zu prüfen. Das könnte prinzipiell in der Weise z. B. geschehen, daß ein leicht drehbar aufgehängtes Stäbchen aus leitender oder stark dielektrischer Substanz der Wirkung eines durch den Raum bewegten Magnetfeldes ausgesetzt würde; das Stäbchen müßte sich dann in der Richtung des vom bewegten Magnetfeld hervorgerufenen elektrischen Felds einstellen, würde also das Gegenstück sein zu der durch die dielektrischen Verschiebungsströme abgelenkten Magnetnadel. Indes versprechen solche Versuche wegen ganz bedeutender experimenteller Schwierigkeiten keinen Erfolg; wohl aber liegt ein Experiment vor, das auf einem etwas indirekten Wege die Existenz des vermuteten elektrischen Feldes dartut. Wilson ließ einen Hartgummihohlzylinder, der innen und außen mit Stanniol beklebt war, in einem kräftigen Magnetfeld, dessen Richtung der Zylinderachse parallel war, rotieren; war die eine Belegung des Zylinders mit Erde, die andere mit einem Elektrometer verbunden, so zeigte letzteres eine Aufladung des Hartgummikondensators in dem durch die Maxwellsche Vorstellung bedingten Sinne an. Es tritt also jedenfalls in dem durch das Magnetfeld hindurchbewegten Dielektrikum eine Polarisierung auf, die die Folge ist eines hier wirksamen elektrischen Feldes. Im übrigen wird auf den Wilsonschen Versuch weiter unten noch zurückzukommen sein.

Die beiden Hauptgleichungen in der bisher hingeschriebenen Form sind noch keine Nahewirkungsgleichungen; sie stellen ja z. B. das Verhalten des Vektors $\mathfrak{H}_l$ längs der geschlossenen Kurve l durch das Verhalten der Größen i_n und $\mathfrak{E}_n$ in der ganzen von l begrenzten Fläche σ von endlicher Ausdehnung dar. Doch sind nun die gewünschten Feldgleichungen aus den angeschriebenen leicht zu erhalten, wenn σ selbst unendlich klein gewählt wird.

Es sei z. B. in einem Rechtsschraubenkoordinatensystem, d. i. einem solchen, in dem die Rechtsdrehung aus der positiven X-Richtung in die positive Y-Richtung einem Fortschreiten der Schraube in der positiven Z-Richtung entspricht, in dem also in der untenstehenden Figur die letztere nach vorn weist, σ gleich der Fläche dxdy. Bildet man nun für einen im Sinne der positiven Z-Achse rechtsgängigen Umlauf das Linienintegral der magnetischen Kraft, so wird dieses

$$\int_l \mathfrak{H}_l\, dl = d\mathfrak{H}_y dy - d\mathfrak{H}_x dx;$$

ferner ist

$$\int_\sigma i_n d\sigma = i_z\, dxdy$$

und
$$\frac{\partial}{\partial t}\int_\sigma \mathfrak{D}_n d\sigma = \frac{\partial \mathfrak{D}_z}{\partial t}\, dxdy.$$

Digitized by Google

Somit wird gemäß der ersten Hauptgleichung und nach Division durch dxdy beiderseits

$$\frac{\partial \mathfrak{H}_y}{\partial x} - \frac{\partial \mathfrak{H}_x}{\partial y} = \frac{1}{c}\left(i_z + \frac{\partial \mathfrak{D}_z}{\partial t}\right).$$

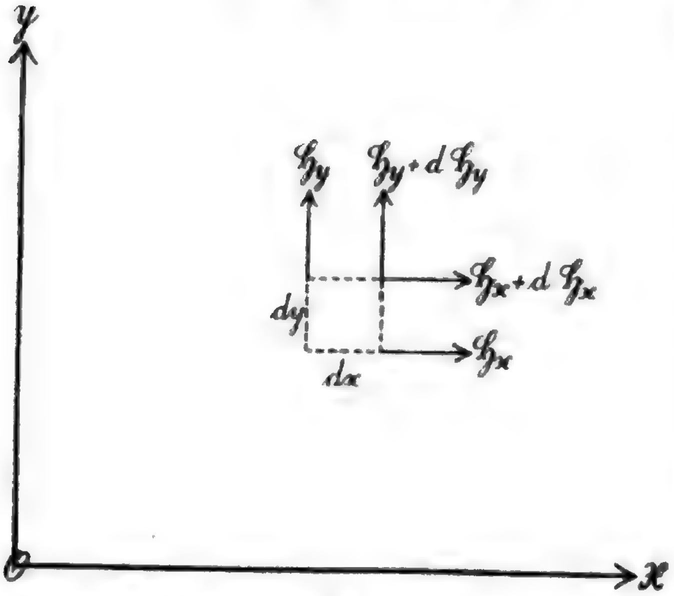


Fig. 1.

Aehnlich entstehen zwei weitere Gleichungen für die durch die X- und Y-Ströme hervorgerufenen magnetischen Kräfte, die mit der angeschriebenen zusammen den Inhalt der ersten Hauptgleichung zum Ausdruck bringen. Drei analoge Gleichungen entsprechen der zweiten Hauptgleichung, so daß die Beziehungen zwischen elektrischen und magnetischen Kräften dargestellt werden durch die Gleichungssysteme

$$c\left(\frac{\partial \mathfrak{H}_z}{\partial y} - \frac{\partial \mathfrak{H}_y}{\partial z}\right) = \left(i_x + \varepsilon \frac{\partial \mathfrak{E}_x}{\partial t}\right)$$
$$c\left(\frac{\partial \mathfrak{H}_x}{\partial z} - \frac{\partial \mathfrak{H}_z}{dx}\right) = \left(i_y + \varepsilon \frac{\partial \mathfrak{E}_y}{\partial t}\right)$$
$$c\left(\frac{\partial \mathfrak{H}_y}{\partial x} - \frac{\partial \mathfrak{H}_x}{\partial y}\right) = \left(i_z + \varepsilon \frac{\partial \mathfrak{E}_z}{\partial t}\right)$$

und

$$c\left(\frac{\partial \mathfrak{E}_y}{\partial z} - \frac{\partial \mathfrak{E}_z}{\partial y}\right) = \mu \frac{\partial \mathfrak{H}_x}{\partial t}$$
$$c\left(\frac{\partial \mathfrak{E}_z}{\partial x} - \frac{\partial \mathfrak{E}_x}{\partial z}\right) = \mu \frac{\partial \mathfrak{H}_y}{\partial t}$$
$$c\left(\frac{\partial \mathfrak{E}_x}{dy} - \frac{\partial \mathfrak{E}_y}{\partial x}\right) = \mu \frac{\partial \mathfrak{H}_z}{\partial t}$$

oder kürzer in der Schreibweise der Vektorrechnung

$$c \operatorname{rot} \mathfrak{H} = i + \varepsilon \frac{\partial \mathfrak{E}}{\partial t}, \quad c \operatorname{rot} \mathfrak{E} = -\mu \frac{\partial \mathfrak{H}}{\partial t}.$$

Diese Gleichungen drücken nun das räumliche Verhalten der magnetischen Feldstärke in nächster Umgebung eines Punktes durch das zeitliche Verhalten der elektrischen Feldstärke in diesem Punkt selbst (sowie durch die hier vorhandene Dichte des Leitungsstroms), und das räumliche Verhalten der elektrischen Feldstärke und nächster Umgebung durch das zeitliche Verhalten der magnetischen Feldstärke im Punkt selbst aus, sind also Nahewirkungsgesetze.

Bemerkt sei, daß die Gleichungen bei Maxwell selbst wesentlich andere Form haben; dort werden die Kräfte erst durch skalare und Vektorpotentiale ausgedrückt, in denen man, wie Hertz bemerkt, noch Rudimente der älteren Fernwirkungsauffassung erkennen muß. Als erster hat Heaviside (1888) die Feldstärke in jedem Punkt des Raums durch Zustände der benachbarten Punkte ausgedrückt; ihm folgte Hertz (1890); beide gelangten zu Gleichungen von im wesentlichen der wiedergegebenen Form. Seitdem verwenden alle Autoren diese Heaviside-Hertzsche Form. Unterschiede bestehen nur noch hinsichtlich konstanter Zahlenfaktoren infolge der Wahl verschiedener Maßsysteme. Das hier benutzte bedingt eben, daß sowohl rot $\mathfrak{H}$ wie rot $\mathfrak{E}$ nur mit dem Faktor c multipliziert erscheinen; bei Verwendung des gewöhnlichen elektrostatischen und magnetischen Maßsystems ($h = k = 1$) ist rot $\mathfrak{H}$ mit dem Faktor $\frac{c}{4\pi}$, rot $\mathfrak{E}$ mit dem Faktor c zu multiplizieren.

6c) Folgerungen aus den Maxwellschen Gleichungen (Fortpflanzungsgeschwindigkeit elektromagnetischer Störungen, Poyntingscher Energiefluß, ponderomotorische Kräfte und Maxwellsche Spannungen). Finden die Aenderungen der elektrischen und magnetischen Größen sehr langsam statt, dann herrscht in jedem Augenblick an jedem Punkt des umgebenden Raumes praktisch dasjenige elektrische und magnetische Feld, welches dauernd herrschen würde, wenn der augenblickliche Wert der maßgebenden Ströme usw. unverändert bliebe (quasistationäre Systeme); alsdann liefert die alte Elektrodynamik die völlige Lösung. Sind aber die Werte $\frac{\partial \mathfrak{E}}{\partial t}$ und $\frac{\partial \mathfrak{H}}{\partial t}$ hinreichend groß, dann lassen sich die Beziehungen zwischen den Größen $\mathfrak{H}$, $\mathfrak{E}$ und i nur durch die Maxwellschen Gleichungen darstellen; und diese sagen ja aus, daß die räumlich-zeitliche Aenderung der elektrischen Kraft eine räumlich-zeitliche Aenderung der magnetischen Kraft bedingt und umgekehrt, daß also eine beliebige Aenderung eines bestehenden Zustandes als elektromagnetische Störung in die Umgebung hinein fortschreiten muß. Für die Geschwindigkeit, mit der sich eine solche Störung ausbreitet, liefern die Gleichungen den Wert $\frac{c}{\sqrt{\varepsilon\mu}}$; es ist also für den freien Aether, in dem ja $\varepsilon = \mu = 1$ ist,

Digitized by Google

die Ausbreitungsgeschwindigkeit eines elektrischen oder magnetischen Zustands (die ja beide nur vereint vorkommen können) gleich dem Verhältnis der elektromagnetischen und der elektrostatischen Stromeinheit. Da nun Maxwell insbesondere die Lichtbewegung als einen elektromagnetischen Vorgang auffaßt, so erklären die Hauptgleichungen die schon vor Maxwell bekannte fundamentale Tatsache, daß jenes Verhältnis mit der Lichtgeschwindigkeit im Aether übereinstimmt. Findet die Ausbreitung nicht im Aether, sondern in einem Isolator mit der Dielektrizitäts-Konstante ε statt (μ ist in Isolatoren stets sehr nahe $= 1$), so ergibt die obige Bezeichnung für den Brechungsexponenten elektromagnetischer Wellen die „Maxwellsche Beziehung“ $n^2 = \varepsilon$, die allerdings keineswegs immer durch die Erfahrung bestätigt wird, es auch nicht kann, da ja diese Beziehung nicht die Abhängigkeit des Brechungsexponenten von der Wellenlänge enthält, also nicht die Dispersion zur Darstellung bringt. In dieser Hinsicht hat die einfache Theorie von Maxwell naturgemäß Erweiterungen erfahren müssen.

Sehr wichtig sind die Energieverhältnisse des elektromagnetischen Feldes. Um im Medium von der Dielektrizitätskonstante ε das elektrostatische Feld vom Betrag $\mathfrak{E}$ herzustellen, ist pro Volumeinheit eine Arbeit aufzuwenden von der Größe $\frac{\varepsilon\mathfrak{E}^2}{2}$; man gelangt zu diesem Ausdruck, wenn man die oben beschriebene Verschiebung einer fiktiven Ladung, die das Feld $\mathfrak{E}$ erzeugt, betrachtet. Nach der Vorstellung Maxwells ist nun die bei diesem Vorgang geleistete Arbeit im Dielektrikum (als Spannung im Aether und elastische Verrückung der gebundenen Elastizitäten des Isolators) aufgespeichert, so daß dessen Volumeinheit die elektrische Energie

$$\frac{\varepsilon\mathfrak{E}^2}{2} = \frac{\mathfrak{E}\mathfrak{D}}{2}$$

enthält. Analog ist eine magnetische Energie vorhanden, die pro Volumeinheit den Betrag besitzt

$$\frac{\mu\mathfrak{H}^2}{2} = \frac{\mathfrak{H}\mathfrak{B}}{2}.$$

Somit ist im Raumelement dS die gesamte elektromagnetische Energie

$$\frac{1}{2}(\varepsilon\mathfrak{E}^2 + \mu\mathfrak{H}^2)\,dS = \frac{1}{2}(\mathfrak{E}\mathfrak{D} + \mathfrak{H}\mathfrak{B})\,dS$$

enthalten. Wird nun dieses Integral erstreckt über einen Raum S, in dem sich keine Energiequellen befinden, dann kann sich dessen Energieinhalt offenbar nur dadurch ändern, daß Energie durch seine Oberfläche hindurchströmt. Es muß deshalb das nichtstatische elektromagnetische Feld von einem Energiestrom durchzogen werden; dieser Energiestrom steht allenthalben senkrecht sowohl auf der elektrischen als auch auf der magnetischen Kraft und ist darzustellen durch einen Vektor $\mathfrak{S}$, der, in vektorieller Schreibweise, gegeben ist durch

$$\mathfrak{S} = [\mathfrak{E}\mathfrak{H}]$$

Die in der Zeiteinheit durch ein Flächenelement $d\sigma$ strömenden Energie ist dann gleich $\mathfrak{S}_n\, d\sigma$, wenn $\mathfrak{S}_n$ die Komponente des Vektors $\mathfrak{S}$ in der Richtung der Flächennormale bedeutet. Der von Poynting (1884) eingeführte Vektor $\mathfrak{S}$ heißt Energiefluß oder Strahlvektor (letztere Bezeichnung knüpft an das Fortschreiten der Energie einer Lichtwelle in der Richtung des Lichtstrahls an). Der Sinn von $\mathfrak{S}$ ist derart, daß die Vektoren $\mathfrak{E}$, $\mathfrak{H}$, $\mathfrak{S}$ in der genannten Reihenfolge ein Rechtsschraubensystem bilden.

Die Poyntingsche Vorstellung von der Energieströmung im elektromagnetischen Feld hat die älteren Vorstellungen von der Energieübertragung in bedeutendem Maße modifiziert. Ein gerader stromdurchflossener Draht entwickelt in seiner Umgebung ein elektrisches Feld parallel zur Drahtachse und ein magnetisches Feld, das in konzentrischen Kreisen um den Draht verläuft. Folglich steht S überall auf der Drahtoberfläche senkrecht und ist nach außen gerichtet, wenn der Draht (infolge von Induktionswirkungen) Stromquelle ist, dagegen nach innen, wenn elektrisches Feld und Strom gleichgerichtet sind. Im ersten Fall strömt also die Energie aus dem Drahtinnern in den Außenraum, im letzten aus dem Außenraum in das Drahtinnere, wo sie in Joulesche Wärme usw. umgewandelt wird. In der Stromquelle (das eben Gesagte gilt z. B. auch für ein galvanisches Element) strömt also die Energie aus der Leitungsbahn heraus, gleitet dicht an den Leitern (nur hier sind $\mathfrak{E}$ und $\mathfrak{H}$ beträchtlich) entlang zu den Verbrauchsapparaten, wo sie wieder in die Leitungsbahn hineinströmt, um dort in andere Energieformen umgesetzt zu werden.

Fließt in einem Leiter Wechselstrom, so strömt die Energie seines magnetischen Feldes abwechselnd von ihm weg in die weitere Umgebung und wieder zu ihm zurück. Ist die in ihm entwickelte Joulesche Wärme zu vernachlässigen und wird die Energie nicht anderweitig (z. B. in einem Transformator) abgefangen, so wird die gesamte Energiemenge, welche in einer Halbperiode die Leitoberfläche verließ, in der nächsten Halbperiode wieder zurückgegeben, vorausgesetzt, daß die Frequenz des Wechselstroms niedrig ist. Anders bei hoher Wechselzahl; dann können sozusagen die vom Leiter ent-

Digitized by Google

wickelten elektrischen und magnetischen Kraftlinien nicht schnell genug zurückgezogen werden, es schnürt sich deshalb ein Teil von ihnen ab von denjenigen, die zum Leiter zurückkehren, und dieser abgeschnürte Teil, natürlich behaftet mit einem entsprechenden Energiebetrag, wandert als freie vom Leiter gänzlich losgelöste elektromagnetische Schwingung in den Raum hinaus. Da diese abgetrennte freie Strahlung sehr schnell mit zunehmender Schwingungszahl wächst, so hat man sie erst nachweisen können, als es gelungen war, Frequenzen von mehreren Hundert Millionen in der Sekunde zu erzeugen (Hertz' freie „Strahlen elektrischer Kraft", 1888).

Schließlich sind noch die ponderomotorischen Kräfte, die an der im elektromagnetischen Feld befindlichen Materie angreifen, einer besonderen Betrachtung zu unterziehen. Man kann diese Kräfte, zunächst für langsame Veränderungen (quasistationäre Vorgänge) sowie für ruhende oder langsam bewegte Körper, welch letztere hier ja stets vorausgesetzt sind, aus der alten Fernwirkungstheorie, also dem Coulombschen Gesetz, sowie dem Gesetz von Biot und Savart und dessen Umkehrung, berechnen; man kann sie auch ermitteln aus der Aenderung der elektromagnetischen Energie des Feldes, die mit einer kleinen Verrückung des Körpers verbunden ist. Aber in beiden Arten der Berechnung kommt nicht das Wesen der Nahewirkung, die doch die Maxwellsche Theorie charakterisiert, zum Ausdruck. Anknüpfend an Vorstellungen von Faraday, hat nun Maxwell selbst eine Auffassung mathematisch formuliert, die diese Forderung erfüllt. Es wird angenommen, daß das Medium des elektromagnetischen Feldes sich in einem Zwangszustand befindet, d. h. von Spannungen durchzogen ist, die auf die einzelnen Teile der Oberfläche eines Raumelements Kräfte (ähnlich den elastischen) ausüben, deren Resultierende die auf das Raumelement wirkende ponderomotorische Kraft darstellt. Die Spannungen werden nun so bestimmt, daß die resultierende Kraft mit der z. B. aus den Fernwirkungsgesetzen berechneten übereinstimmt. Dabei ergibt sich, daß die ponderomotorischen Kräfte elektrostatischer Herkunft darstellbar sind durch einen Spannungszustand, der besteht aus einem Zug in der Richtung der Feldstärke $\mathfrak{E}$ (also in der Richtung der elektrostatischen Kraftlinien) von der Größe $\frac{\varepsilon}{2}\mathfrak{E}^2$ pro Flächeneinheit (also von der Größe der elektrostatischen Energiedichte des Felds an der betreffenden Stelle) sowie einem Druck senkrecht zu den Kraftlinien vom gleichen Betrage. Enthält nun das betreffende Raumelement keine freie Elektrizität, dann ist die Verteilung der Feldstärke derart, daß alle an seiner Oberfläche angreifenden Zug- und Druckkräfte sich einander das Gleichgewicht halten, so daß die resultierende ponderomotorische Kraft Null ist; ist aber freie Elektrizität vorhanden, dann ist $\mathfrak{E}$ an den verschiedenen Stellen der Oberfläche des Raumelementes in solcher Weise verschieden, daß die Resultante aller Zug- und Druckkräfte in der Tat identisch wird mit der z. B. aus dem Coulombschen Gesetz berechneten ponderomotorischen Kraft. Für die ponderomotorischen Kräfte magnetischer und elektromagnetischer bezw. elektrodynamischer Herkunft ergibt sich in ähnlicher Weise die Darstellung durch einen Spannungszustand, der aber hier im allgemeinen ziemlich verwickelt ist; für den Fall schwach magnetisierbarer Medien besteht er aus einem Zug in der Richtung der magnetischen Kraftlinien vom Betrag $\frac{\mu}{2}\mathfrak{H}^2$ und einem ebenso großen Druck senkrecht zu den Kraftlinien; ist also das Raumelement z. B. vom Strom durchflossen, dann verhält sich $\mathfrak{H}$ (gemäß der I. Hauptgleichung) derart, daß die auf seine Oberfläche wirkenden Zug- und Druckkräfte sich nicht das Gleichgewicht halten, sondern eine Resultierende liefern, die mit der aus der Umkehrung des Gesetzes von Biot und Savart berechneten Kraft übereinstimmt. Daß übrigens dieser Spannungszustand im elektromagnetischen Feld mit gewöhnlichen elastischen Spannungen nichts zu tun haben kann, ist wohl ohne weiteres klar; in Luft z. B., in der ja ein elektrostatisches oder magnetisches Feld sehr wohl bestehen kann, sind nur allseitige elastische Druckkräfte, keine Zugkräfte möglich.

Die genannten Maxwellschen Spannungen stellen in dem einfachsten Fall, in dem keine oder nur langsame Bewegungen und keine oder nur langsame Aenderungen der Feldgrößen vorkommen, die ponderomotorischen Kräfte unzweifelhaft vollkommen richtig dar; Schwierigkeiten entstehen aber, wenn die Bewegungen und Aenderungen schnell geschehen. Nur der letztere Fall sei hier besprochen.; $\frac{\partial\mathfrak{E}}{\partial t}$ und $\frac{\partial\mathfrak{H}}{\partial t}$ seien also beträchtlich. Dann fließt auch im Isolator ein elektrischer und ebenso ein magnetischer Verschiebungsstrom, deshalb sind $\mathfrak{E}$ und $\mathfrak{H}$ räumlich nicht so verteilt, daß die an einem Raumelement des Isolators angreifenden Zug- und Druckkräfte sich aufheben, sondern es wirkt, auch wenn keine freien elektrischen und magnetischen Ladungen vorhanden sind, auf die Volumeinheit eine Kraft, die den Betrag

Digitized by Google

hat $\frac{\varepsilon\mu}{c^2}\frac{\partial\mathfrak{S}}{\partial t}$, worin $\mathfrak{S}$ der Poyntingsche Strahlvektor ist; diese Kraft wird als Strahlungsdruck bezeichnet und ist experimentell festgestellt worden (Lebedew, 1900). Diese Kraft wirkt also auch in der Größe $\frac{1}{c^2}\frac{\partial\mathfrak{S}}{\partial t}$ auf den freien Aether, sobald in diesem schnelle elektromagnetische Vorgänge geschehen; dadurch müßten Bewegungen des Aethers eintreten, von denen nie etwas bemerkt worden ist. Prinzipiell wichtig ist ferner, daß hiernach das Gesetz der Gleichheit von Wirkung und Gegenwirkung, welches die aus den Maxwellschen Spannungen abgeleiteten Kräfte für das ganze System Materie + Aether befolgen, eben deswegen für die Materie allein nicht mehr gilt.

7. **Die Hertzschen Gleichungen für bewegte Körper.** Schon Maxwell hat seine Theorie auf bewegte Medien angewandt; in ausführlicher Weise ist dies dann von Hertz (1900) geschehen. Die Schwierigkeit, um die es sich hier handelt, besteht in der Frage, ob der Aether als Träger der Feldkräfte sich mit der Materie bewegt oder ob er ruht. Hertz meint zwar, daß die Bewegung des Aethers von derjenigen der Materie unabhängig zu sein scheine; um aber die hierdurch geforderte Komplikation, die durch die Einführung mindestens je zweier Richtungsgrößen für den elektrischen und den magnetischen Zustand an jeder Stelle entstehen würde, zu vermeiden, macht er die Annahme, daß dem raumerfüllenden Mittel in jedem Punkt eine einzige Geschwindigkeit $\mathfrak{w}$ beizumessen sei, die dann sowohl diejenige der Materie als auch diejenige des Aethers ist. Dann bewegen sich mit der Materie auch die ihren elektrischen und magnetischen Zustand bedingenden Kraftlinien; und die ganze zeitliche Aenderung der Feldgrößen an irgendeiner Stelle des Raumes setzt sich zusammen aus der durch diese Bewegung der Kraftlinien bedingten und derjenigen, die auch im Ruhezustand geschehen würde. Das führt schließlich zu den folgenden Feldgleichungen, die der Kürze halber nur in vektorieller Schreibweise wiedergegeben werden mögen:

$$c \operatorname{rot} \mathfrak{H} = \mathfrak{i} + \frac{\partial\mathfrak{D}}{\partial t} + \varrho\mathfrak{w} + \operatorname{rot}[\mathfrak{D}\mathfrak{w}]$$

und $$c \operatorname{rot} \mathfrak{E} = -\frac{\partial\mathfrak{B}}{\partial t} - \operatorname{rot}[\mathfrak{B}\mathfrak{w}].$$

Demnach behalten die Gleichungen im Prinzip dieselbe Form wie in ruhenden Medien, nur daß die rechten Seiten, welche die Dichte der elektrischen bezw. magnetischen Strömung darstellen, durch Glieder zu ergänzen sind, die im Ruhezustand ($\mathfrak{w} = 0$) fortfallen. Die gesamte elektrische Strömung enthält also nach der ersten Gleichung den gewöhnlichen elektrischen Leitungsstrom $\mathfrak{i}$ und den dielektrischen Verschiebungsstrom $\frac{\partial\mathfrak{D}}{\partial t}$; ferner ist $\varrho\mathfrak{w}$ der „Konvektionsstrom", der dadurch zustandekommt, daß die am bewegten Körper haftende elektrische Ladung ϱ mit der Geschwindigkeit $\mathfrak{w}$ forttransportiert wird, und $\operatorname{rot}[\mathfrak{D}\mathfrak{w}]$ ein von Röntgen zuerst beobachteter und deshalb „Röntgenstrom" genannter Effekt, der herrührt von der Bewegung der im elektrisch polarisierten Medium anzunehmenden „fingierten Ladungen", daher als fingierter Konvektionsstrom zu bezeichnen ist. Alle diese Komponenten des elektrischen Gesamtstroms üben magnetisierende Wirkungen aus, die ebenso zu berechnen sind, wie die des gewöhnlichen Leitungsstroms aus dem Gesetz von Biot und Savart. Die zweite Gleichung sagt das Analoge aus bezüglich des magnetischen Gesamtstroms, der sich zusammensetzt aus dem magnetischen Verschiebungsstrom $\frac{\partial\mathfrak{B}}{\partial t}$ und dem dem Röntgenstrom entsprechenden fingierten magnetischen Konvektionsstrom $\operatorname{rot}[\mathfrak{B}w]$; hier fehlt der Leitungsstrom und der wahre Konvektionsstrom, weil es wahren Magnetismus nicht gibt.

Man hat versucht, die magnetische Wirkung von Konvektions- und Röntgenstrom und die elektromotorische Wirkung des fingierten magnetischen Konvektionsstroms durch direkte Experimente nachzuweisen. Ein magnetisches Feld des Konvektionsstroms hat zuerst Rowland festgestellt; auf dem von ihm eingeschlagenen Wege (Rotieren geladener Metallscheiben) hat insbesondere Eichenwald die quantitative Uebereinstimmung dieser magnetischen Wirkung mit derjenigen des äquivalenten Leitungsstroms ($\mathfrak{i} = \varrho\mathfrak{w}$) dargetan. Auch den magnetischen Effekt des zuerst von Röntgen beobachteten fingierten Konvektionsstroms (eine Platte aus Hartgummi o. dgl. rotiert zwischen feststehenden Metallplatten, die auf verschiedenes Potential gebracht sind, also in der Hartgummiplatte eine dielektrische Polarisation hervorrufen), hat Eichenwald mit der Theorie in guter Uebereinstimmung befunden. Die elektromotorische Wirkung des magnetischen Röntgenstroms hängt aufs engste zusammen mit der schon lange bekannten Erscheinung der unipolaren Induktion, die dem Röntgeneffekt durchaus analog wäre, wenn letzterer mit permanent polarisierten Dielektricis angestellt werden könnte.

Was die ponderomotorischen Kräfte anlangt, so sind diese, ähnlich wie bei Maxwell, aus einem System von Spannungen zu be-

Digitized by Google

rechnen, die aber hier andere Werte haben, wie bei Maxwell; übrigens kommen die Unterschiede nur bei permanent magnetisierbaren Körpern zur Geltung. Wie bei Maxwell werden auch hier auf den Aether selbst ponderomotorische Kräfte ausgeübt, sobald der Poyntingsche Strahlvektor nicht konstant ist, also strenggenommen in allen nicht stationären Feldern; da aber der Aether als beweglich vorausgesetzt ist, so müssen diese Kräfte ihn in Strömung setzen. Auf diesen Umstand hat Hertz selbst zuerst aufmerksam gemacht und ihm wenig innere Wahrscheinlichkeit zugeschrieben.

Ernster als diese Bedenken sprechen die Resultate neuerer Versuche gegen die Maxwell-Hertzsche Theorie in bewegten Medien. Hertz selbst waren (1890) noch keine rein elektrodynamischen Versuche bekannt, die mit seiner Auffassung unvereinbar gewesen wären; inzwischen aber sind zwei Experimente, von Eichenwald und von Wilson, bekannt geworden, die auf Grund der Hertzschen Theorie unverständlich sind. Eichenwald (1903) ließ einen geladenen Kondensator mit Belegungen und Dielektrikum um die Plattennormale rotieren und schloß aus der magnetischen Wirkung auf einen Röntgenstrom von der Dichte $(\varepsilon - 1)$ $\mathfrak{E}\mathfrak{w}$, während nach der Hertzschen Theorie $\varepsilon\mathfrak{E}\mathfrak{w}$ zu erwarten ist. Wilson (1904, s. o.) fand, daß ein Kondensator mit Dielektrikum, der in einem kräftigen Magnetfeld derart bewegt wurde, daß die Plattennormale senkrecht zu den Kraftlinien stand und daß senkrecht zu beiden die Bewegung erfolgte, eine Flächenladung aufwies von der Dichte $(\varepsilon - 1)\mathfrak{H}\mathfrak{w}$, während nach der Hertzschen Theorie $\varepsilon\mathfrak{H}\mathfrak{w}$ hätte gefunden werden müssen. Beide rein elektrodynamischen Erfahrungen (und dazu einige optische, vgl. den Artikel „Lichtfortpflanzung in bewegten Medien“) lehren, daß die Vorstellung vom mitbewegten Aether mit den beobachteten Tatsachen im Widerspruch steht.

Cohn (1902) hat deshalb die Annahme gemacht, daß der Aether stets ruht; sein Gleichungssystem erklärt dann in der Tat alle bekannten Versuche; doch leistet dasselbe auch die modifizierte Lorentzsche Theorie, die zudem die atomistische Struktur der Elektrizität einführt und dadurch imstande ist, auch für eine Reihe optischer Phänomene (Dispersion und Absorption) mathematische Ansätze zu liefern.

8. Theorie von Lorentz. Die Maxwellsche Theorie ist gewissermaßen eine makroskopische; sie formuliert ganz neue Grundprinzipien, wendet diese aber in einer summarischen Weise an, die nicht die Mittel an die Hand gibt, von den elektromagnetischen Vorgängen in der Materie ein klares und detailliertes Bild zu entwerfen. Die Weiterentwickelung der Theorie mußte daher in dem von der wahrnehmbaren Materie eingenommenen Raum differenzieren den nicht weiter analysierbaren Aether und dasjenige Materielle, das die elektrischen und magnetischen Verschiebungen im Aether zu beeinflussen vermag. Dies letztere konnten nur ruhende oder bewegte elektrische Ladungen sein; über deren Struktur mußten also bestimmte Annahmen gemacht werden. Dies sind die Gesichtspunkte, die die Elektronentheorie von H. A. Lorentz (1895) leiten.

Die elektrische Ladung wird atomistisch konstituiert gedacht; diese Auffassung ist ja durch zahlreiche Tatsachen (Elektrolyse, Kathoden- und Becquerel-Strahlen usw.) und durch die Erfolge der hierauf fußenden Theorie der elektrischen und Wärmeleitfähigkeit in den Metallen usw. wohl begründet. Die elektrischen Atome sollen, ohne Rücksicht darauf, ob sie mit gewöhnlicher Materie behaftet sind oder nicht, „Elektronen“ heißen; sie, und nur sie, vermögen elektromagnetische Felder zu erregen und durch solche Felder beeinflußt zu werden. Die Elektronen, denen ein sehr kleines, aber endliches Volumen zukommt, befinden sich im Aether; die Materie kommt nur insoweit in Betracht, als sie Elektronen enthält und ihre Bestandteile Kräfte auf die Elektronen auszuüben vermögen. Von den Elektronen gibt es 3 Arten: Leitungselektronen, Polarisationselektroden, die durch quasielastische Kräfte an bestimmte Stellen der Materie gebunden sind, und Magnetisierungselektronen, die vermöge ihrer Bewegung um Rotationsachsen magnetische Felder im Aether zu erzeugen bezw. zu beeinflussen vermögen. Der Aether mit seinen unveränderlichen Eigenschaften durchdringt alles, nicht nur die Zwischenräume zwischen den Elektronen, sondern auch diese selbst. Seine Teile sind gegeneinander nicht bewegbar, er ist also starr und insofern ruhend; durch ihn hindurch bewegen sich die Elektronen, sei es infolge der Translation der Materie oder vermöge der Geschwindigkeit, die sie gegen diese haben. Alle elektrodynamischen Wirkungen gehen von Elektronen aus und wirken nur auf solche; mit anderen Worten, nur die ruhenden oder bewegten Elektronen üben Kräfte aufeinander aus. Man erkennt, daß diese ganze Auffassung sich den Vorstellungen der Weberschen Theorie nähert; indes sind es hier die den Maxwellschen Gleichungen gehorchenden Feldkräfte im Aether, die die Kraftwirkungen vermitteln.

Die dielektrische Verschiebung $\mathfrak{D}$ (von Lorentz „elektrische Erregung“ genannt) setzt sich zusammen aus 2 Teilen, der Feldstärke $\mathfrak{E}$ im Aether und der Polarisation $\mathfrak{P}$,

Digitized by Google

die aus den Verschiebungen der Polarisations-Elektronen in der Materie resultiert und die durch das elektrische Moment der Volumeinheit gemessen wird, also $\mathfrak{D} = \mathfrak{E} + \mathfrak{P}$. Auf Grund gewisser Annahmen läßt sich $\mathfrak{P} = \eta\mathfrak{E}$ setzen und der für hinreichend langsame Aenderungen konstante Faktor η durch eine dreikonstantige Formel ausdrücken. Ebenso läßt sich dann die „Dielektrizitätskonstante“ $\frac{\mathfrak{D}}{\mathfrak{E}} = \varepsilon = 1 + \eta$ angeben; dies würde der dispersionslosen Dielektrizitätskonstanten der Maxwellschen Theorie entsprechen. Für schnell veränderliche Feldkräfte wird aber η und damit ε abhängig von der Aenderungsgeschwindigkeit, woraus sich Abhängigkeit des Brechungsexponenten von der Schwingungszahl ergibt. Weit weniger befriedigend vermag die Elektronentheorie die magnetischen Eigenschaften der Materie, besonders den Ferromagnetismus zu erklären: erst ganz neuerdings sind hier in Sonderfällen Ansätze gelungen, die den Messungsergebnissen zu entsprechen scheinen (Langevin, Weiß, Gans).

Das Medium, in dem sich die elektromagnetischen Vorgänge abspielen und für welches daher die Feldgleichungen anzusetzen sind, ist in der Lorentzschen Theorie nur der ruhende Aether. Die beiden Hauptgleichungen unterscheiden sich für den Fall ruhender Medien nicht von den Maxwellschen; nur für bewegte Medien treten Aenderungen ein, und zwar beziehen sich diese auf die Komponenten des Gesamtstroms in der ersten Hauptgleichung. Ist $\mathfrak{w}$ die Geschwindigkeit der Materie, $\mathfrak{u}$ die Geschwindigkeit der einzelnen Elektronen in dieser, also $\mathfrak{v} = \mathfrak{w} + \mathfrak{u}$ die absolute Geschwindigkeit der Elektronen, so ist die Dichte des Gesamtstroms

$$\mathfrak{C} = \frac{\partial\mathfrak{E}}{\partial t} + \overline{\varrho\mathfrak{v}},$$

wo $\overline{\varrho\mathfrak{v}}$ der Mittelwert ist der Produkte aus den räumlichen Ladungsdichten der bewegten Elektronen und ihren Geschwindigkeiten $\mathfrak{v}$. Dieser Betrag $\overline{\varrho\mathfrak{v}}$ enthält die folgenden Anteile: denjenigen der Leitungselektronen $= \mathfrak{i}$, denjenigen der Konvektion etwaiger Ladungen $\varrho' = \varrho'\mathfrak{w}$, denjenigen der Polarisationselektronen $= \frac{\partial\mathfrak{P}}{\partial t} + \mathrm{rot}[\mathfrak{P}\mathfrak{w}]$ und denjenigen der Magnetisierungselektronen $= c$ rot $\mathfrak{M}$, wo $\mathfrak{M}$ die „Magnetisierung“ oder das magnetische Moment der Volumeinheit bedeutet ($\mathfrak{M} = \mathfrak{B} - \mathfrak{H}$). Für sehr schwach magnetisierbare Medien ist der letzte Anteil zu vernachlässigen und der Gesamtstrom wird

$$\mathfrak{C} = \mathfrak{i} + \varrho'\mathfrak{w} + \frac{\partial\mathfrak{E}}{\partial t} + \frac{\partial\mathfrak{P}}{\partial t} + \mathrm{rot}\,[\mathfrak{P}\mathfrak{w}].$$

Dieser Gesamtstrom ist identisch mit demjenigen der Hertzschen Theorie, bis auf den Röntgenstrom, der bei Hertz den Betrag rot $[\mathfrak{D}\mathfrak{w}]$, hier aber den Betrag rot $[\mathfrak{P}\mathfrak{w}]$ hat; der Unterschied rührt daher, daß bei Hertz wegen der Mitbewegung des Aethers die ganze dielektrische Verschiebung $\mathfrak{D}$, bei Lorentz aber nur die an die Materie geknüpfte Polarisation $\mathfrak{P}$ mit transportiert wird. Die Lorentzsche Theorie liefert daher richtig das Resultat des oben erwähnten Versuchs von Eichenwald, der mit der Hertzschen Theorie im Widerspruch stand.

Aehnlich ergibt sich die Erklärung des früher beschriebenen Wilsonschen Versuchs. Da sich mit dem Isolator nur dessen Polarisation mitbewegt, so muß die Aufladung der Kondensatorplatten gegenüber der Hertzschen Theorie hier kleiner erscheinen im Verhältnis $\frac{\mathfrak{P}}{\mathfrak{D}} = \frac{\eta}{\varepsilon} = \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon}$; das aber ist das Resultat, das der Wilsonsche Versuch ergeben hat.

Durch Einführung der Komponenten des Gesamtstroms erhalten die Lorentzschen Feldgleichungen für bewegte (und schwach magnetisierbare) Medien die Form

$$c\,\mathrm{rot}\,\mathfrak{H} = \frac{\partial\mathfrak{D}}{\partial t} + \mathfrak{i} + \varrho'\mathfrak{w} + \mathrm{rot}\,[\mathfrak{P}\mathfrak{w}],$$

$$c\,\mathrm{rot}\,\mathfrak{E} = -\frac{\partial\mathfrak{B}}{dt}.$$

Im ruhenden Körper setzt sich die auf die Einheitsladung ausgeübte Kraft zusammen aus der elektrischen Feldstärke $\mathfrak{E}$ und dem Anteil $\frac{1}{c}[\mathfrak{u}\mathfrak{B}]$, der die Wirkung des Magnetfeldes auf den Strom darstellt, welcher äquivalent ist der bewegten Ladung von der Geschwindigkeit $\mathfrak{u}$. Im bewegten Körper wird also diese Kraft

$$\mathfrak{E} + \frac{1}{c}[\mathfrak{v}\mathfrak{B}] = \mathfrak{E} + \frac{1}{c}[\mathfrak{w}\mathfrak{B}] + \frac{1}{c}[\mathfrak{u}\mathfrak{B}]$$

$$= \mathfrak{E}' + \frac{1}{c}[\mathfrak{u}\mathfrak{B}],$$

wo

$$\mathfrak{E}' = \mathfrak{E} + \frac{1}{c}[\mathfrak{w}\mathfrak{B}]$$

die Kraft auf eine relativ zur Materie ruhende Einheitsladung ist. Diese Kraft $\mathfrak{E}'$ ist es, die sowohl den Leitungsstrom $\mathfrak{i} = \sigma\mathfrak{E}'$, als auch die Polarisation $\mathfrak{P} = \eta\mathfrak{E}' = (\varepsilon - 1)\mathfrak{E}'$ in bewegten Körpern bestimmt; daher wird hier

$$\mathfrak{D} = \mathfrak{E} + (\varepsilon - 1)\,\mathfrak{E}' = \varepsilon\mathfrak{E} + \frac{\varepsilon - 1}{c}[\mathfrak{w}\mathfrak{B}].$$

Dem analog ist

$$\mathfrak{B} = \mu\mathfrak{H} - \frac{\varepsilon - 1}{c}[\mathfrak{w}\mathfrak{D}].$$

Was schließlich die durch das elektro-

Digitized by Google

magnetische Feld übertragenen ponderomotorischen Kräfte anlangt, so lassen sie sich ausdrücken als Summe von 2 Anteilen. Deren erster ist ein System von Spannungen, das vollständig übereinstimmt mit dem der Maxwellschen Spannungen; allerdings sind im Sinne der Lorentzschen Theorie diese Spannungen nur als fiktive aufzufassen, da sie ja, gemäß der Grundvorstellung, durch Zustände im Aether bedingt sind, der aber, als ein in sich starres Gebilde, auf keine Kräfte reagieren kann. Dazu kommt der Anteil $-\frac{1}{c^2}\frac{\delta\mathfrak{S}}{\partial t}$. Wie schon früher betont wurde, ergibt sich aus dem System der Maxwellschen Spannungen, daß auf die Volumeinheit des freien Aethers die Kraft $+\frac{1}{c^2}\frac{\delta S}{\partial t}$ ausgeübt wird, wenn die Feldgrößen $\mathfrak{E}$ und $\mathfrak{H}$ sich zeitlich ändern. In der Lorentzschen Theorie wird also diese Kraft gerade durch den erwähnten zweiten Anteil kompensiert, so daß nun in der Tat der Aether selbst niemals Kräften unterworfen ist.

In der bisher besprochenen Form erklärt die Lorentzsche Theorie alle Erscheinungen, welche an langsam bewegten Körpern, d. h. solange $\mathfrak{w}$ so klein gegen c ist, daß Größen mit w^2/c^2 vernachlässigbar sind, beobachtet werden. Anders wird es, wenn $\mathfrak{w}$ bezw. die Meßgenauigkeit so groß sind, daß auch Glieder mit w^2/c^2 berücksichtigt werden müssen. Der Prüfung bietet sich die Erdbewegung dar, die nach der Lorentzschen Theorie auf eine Anzahl von Erscheinungen einen meßbaren Einfluß zweiter Ordnung haben müßte, der aber in den Versuchen nicht festzustellen war. Der wichtigste dieser Versuche ist der Interferenzversuch von Michelson (vgl. die Artikel „Lichtinterferenz“ und „Lichtfortpflanzung“), dessen Genauigkeit sich soweit hat treiben lassen, daß 1 % der nach der Lorentzschen Theorie zu erwartenden Streifenverschiebung hätte beobachtet werden müssen, während sich keine Spur einer solchen zeigte. Von anderen Versuchen sei der von Trouton und Noble erwähnt: ein mit der Erde bewegter geladener Kondensator sollte nach Lorentz in dem von ihm selbst erzeugten Magnetfeld ein Drehmoment von der Ordnung $(\mathfrak{w}/c)^2$ erfahren, das aber, bis auf die Meßgenauigkeit von 5 % des erwarteten Effektes, nicht gefunden wurde. In diesen Fällen ist Uebereinstimmung zwischen Theorie und Experiment zu erzielen, wenn man mit Fitzgerald und Lorentz annimmt, daß alle Körper bei der Bewegung ihre Dimensionen, und zwar nur in Richtung ihrer Geschwindigkeit, ändern im Verhältnis $(1-\mathfrak{w}^2/2c^2)$. In der Tat stehen alle beobachteten Erscheinungen mit der so erweiterten Theorie in Einklang.

9. Das Relativitätsprinzip in der Elektrodynamik. Obwohl die durch die erwähnte Kontraktionshypothese erweiterte Lorentzsche Theorie alle bisher beobachteten Erscheinungen befriedigend erklärt, ist doch die Einführung jener Hypothese wenig befriedigend, da sie eben nur einen Widerspruch zwischen Theorie und Experiment beseitigen soll, im übrigen aber nicht tiefer begründet erscheint. Eine solche Begründung bezw. die Zurückführung auf ein allgemeines Prinzip ist von Einstein (1905) gegeben worden. Dieses Einsteinsche „Relativitätsprinzip“ besagt: „Die Gesetze, nach denen sich die Zustände in physikalischen Systemen ändern, sind unabhängig davon, auf welches von zwei relativ zueinander in gleichförmiger Translationsbewegung befindlichen Koordinatensystemen diese Zustandsänderungen bezogen werden.“ D. h. transformiert man beim Uebergang von einem Bezugssystem zu einem anderen die Koordinaten in der geeigneten Weise, dann wird derselbe physikalische Vorgang in beiden Systemen durch dieselbe Gleichung ausgedrückt; somit ist kein System vor dem anderen bevorzugt, es gibt unendlich viele gleichberechtigte, in denen keinerlei Messungen irgendwelche Unterschiede ergeben können. Es läßt sich durch keine Messung in einem materiellen System feststellen, ob dieses System ruht oder ob es sich mit beliebiger gleichförmiger Geschwindigkeit bewegt. Daraus ergibt sich ohne weiteres, daß die Erdbewegung keinen Einfluß auf den Verlauf der von uns beobachteten elektrodynamischen Erscheinungen haben kann.

Betrachtet man als physikalischen Vorgang die Ausbreitung des Lichts von einer punktförmigen Lichtquelle im leeren Raum, das eine Mal im System xyz, das relativ zur Lichtquelle ruhen soll, das andere Mal in einem gegen die Lichtquelle bewegten System x'y'z', dann erkennt man, daß eine konstante Lichtfortpflanzungsgeschwindigkeit c nach allen Richtungen durch bloße Abänderung der x'y'z' gegenüber den xyz nicht zu erzielen ist. Vielmehr ist es erforderlich, auch die Zeit t' im bewegten System anders zu wählen als im ruhenden System, damit $x^2+y^2+z^2-c^2t^2 = x'^2+y'^2+z'^2-c^2t'^2$ (Gleichung der sich mit derselben Geschwindigkeit c ausbreitenden Kugelwelle) erfüllt sei. Hieraus ergeben sich, falls w die Relativgeschwindigkeit des bewegten Systems gegen das ruhende parallel der X-Achse ist, ist die Transformationsgleichungen

$$x' = \beta(x-\mathfrak{w}t),\; y' = y,\; z' = z,$$
$$t' = \beta\left(t-\frac{\mathfrak{w}}{c^2}x\right) \text{ mit } \beta = \frac{1}{\sqrt{1-w^2/c^2}}.$$

Diese Gleichungen, die schon von Lorentz benutzt worden sind, werden als Lorentztransformationen bezeichnet; aus ihnen folgt die Lorentzsche Kontraktion in der Richtung der Bewegung.

Die Anwendung des genannten Prinzips auf die Elektrodynamik stellt also die Forderung, Feldgleichungen zu finden, die gegen die Lorentztransformationen invariant sind und, bezogen auf das relativ zur Materie ruhende System, mit den Maxwellschen Gleichungen identisch werden. Solche Gleichungen hat Minkowski angegeben; sie lauten, in gewöhnliche Vektorschreibweise übertragen:

$$c \operatorname{rot} \mathfrak{H} = \frac{\partial \mathfrak{D}}{\partial t} + \mathfrak{i} + \varrho \mathfrak{w}, \quad c \operatorname{rot} \mathfrak{E} = -\frac{\partial \mathfrak{B}}{\partial t}$$

$$\mathfrak{D} + \frac{1}{c}[\mathfrak{w}\mathfrak{H}] = \varepsilon\left(\mathfrak{E} + \frac{1}{c}[\mathfrak{w}\mathfrak{B}]\right), \quad \mathfrak{B} - \frac{1}{c}[\mathfrak{w}\mathfrak{E}] = \mu\left(\mathfrak{H} - \frac{1}{c}[\mathfrak{w}\mathfrak{D}]\right)$$

$$\mathfrak{i} = \frac{\lambda}{\beta}\left\{\mathfrak{E} + \frac{1}{c}[\mathfrak{w}\mathfrak{B}] - \frac{\left(\mathfrak{w}, \mathfrak{E} + \frac{1}{c}[\mathfrak{w}\mathfrak{B}]\right)}{c^2}\mathfrak{w}\right\}$$

Diese Gleichungen gelten mit derselben Genauigkeit wie das Relativitätsprinzip; für genügend kleine Werte von $\mathfrak{w}/c$ und für nicht magnetisierbare Körper ($\mu = 1$) gehen sie in die angeschriebenen Lorentzschen Gleichungen über.

Die ponderomotorische Kraft, zu der Minkowski gelangt, wird, spezialisiert auf einen ruhenden, isotropen, homogenen Körper im Magnetfeld, von Null verschieden, wenn dieser Körper im Magnetfeld von einem Leitungsstrom durchflossen wird; sie wird aber Null, wenn der äquivalente Verschiebungsstrom vorhanden ist (Einstein und Laub); es besteht also in dieser Hinsicht ein prinzipieller Unterschied zwischen Leitungs- und Verschiebungsstrom, ein Umstand, der mit der sonstigen grundsätzlichen Gleichheit dieser beiden Komponenten des Gesamtstroms wenig harmoniert. Außerdem genügt die Minkowskische Kraft dem Impulssatz nicht, d. h. die Summe aus der mechanischen und der elektromagnetischen Bewegungsgröße ist für ein abgeschlossenes System nicht konstant. Indem Abraham von der Impulsgleichung und der Poyntingschen Energiegleichung ausging, konnte er die ponderomotorische Kraft aus einer Reihe von Spannungsgrößen ableiten, die zum Teil mit den gewöhnlichen Maxwellschen Spannungen identisch sind, zum Teil zusammenhängen mit den Komponenten des Poyntingschen Strahlvektors, und aus denen durch eine verwickelte Differentialoperation die Komponenten der ponderomotorischen Kraft erhalten werden können. Diese genügen nun sowohl dem Relativitätsprinzip als auch dem Impulssatz.

Nicht unerwähnt bleibe, daß die Einsteinsche Form der Relativitätstheorie manchen Gegner gefunden hat. Insbesondere wird die Aenderung im Gang der Uhren und die Kontraktion starrer Körper als allzugroße Schwierigkeit empfunden. Es scheint, daß auch ohne diese eine Theorie physikalischer Vorgänge, die die Nichterkennbarkeit der absoluten Bewegung ergibt, gefunden werden kann.

Die Relativitätstheorie hat die alte Frage nach einem stoffartigen Träger der Lichtbewegung, dem „Aether", von neuem aufgerollt. Wenn von diesem Stoff durch keinerlei Experimente festzustellen ist, ob er ruht oder sich in beliebiger gleichförmiger Bewegung befindet, dann erscheint die Aetherhypothese unnötig; vielmehr treten dann die elektromagnetischen Felder als selbständige Gebilde auf, während der nicht von Strahlung durchsetzte, von ponderabler Materie freie Raum wirklich leer ist (Einstein). Hiernach ist die Energie etwas für sich Existierendes, sie wird von Lichtquellen emittiert und besitzt Masse und Individualität (Planck's Energieelement), verhält sich also nun ihrerseits stoffartig.

Literatur. *Lehrbücher und zusammenfassende Darstellungen:* ***P. Drude,*** *Physik des Aethers, Stuttgart 1894.* — ***A. Winkelmann,*** *Handbuch der Physik, 2. Aufl., Bd. V (1908): Elektrodynamik* (***K. Waitz***), *Induktion* (***Derselbe***), *Die Theorien der elektrischen Erscheinungen* (***L. Graetz***). — *Encyklopädie der mathem. Wissenschaften, Bd. V, 2 (1904): Standpunkt der Fernwirkung* (***Reiff und Sommerfeld***), *Maxwells elektromagnetische Theorie* (***H. A. Lorentz***), *Elektronentheorie* (***Derselbe***). — ***Abraham und Föppl,*** *Theorie der Elektrizität, 2 Bde., 4. bezw. 2 Aufl., Leipzig 1912 und 1908.* — ***G. Mie,*** *Lehrbuch der Elektrizität und des Magnetismus, Stuttgart 1910.*

Einzelwerke und gesammelte Abhandlungen: ***C. Neumann,*** *Die elektrischen Kräfte, 2 Bde., Leipzig 1873 und 1878.* — ***C. Maxwell,*** *Lehrbuch der Elektrizität und des Magnetismus (deutsche Uebersetzung von B. Weinstein), 2 Bde., Berlin 1883.* — ***H. Hertz,*** *Gesammelte Werke, 2. Aufl., besonders Bd. II, Leipzig 1894.* — ***H. A. Lorentz,*** *Versuch einer Theorie der elektrischen und optischen Erscheinungen in bewegten Körpern,*

Digitized by Google

Leipzig 1906. — **M. Laue,** *Das Relativitätsprinzip, Braunschweig 1911.*

Neuere Abhandlungen: **Röntgen,** *Berl. Ber.* 195, *1885.* — **Eichenwald,** *Phys. Z.* 2, *703, 1901; Ann. d. Phys.* 11, *1, 1903; Phys. Z.* 4, *308, 1903; Ann. d. Phys.* 13, *919, 1904.* — **Wilson,** *Proc. Roy. Soc.* 73, *490, 1904.* — **Michelson und Morley,** *Sill. Journ.* 34, *333, 1887.* — **Trouton und Noble,** *Proc. Roy. Soc.* 72, *132, 1903.* — **Cohn,** *Ann. d. Phys.* 7, *29, 1902.* — **H. A. Lorentz,** *Proc. Amsterdam* 6, *809, 1904.* — **Einstein,** *Ann. d. Phys.* 17, *891, 1905; Phys. Z.* 10, *185 und 819, 1909.* — **H. Minkowski,** *Gött. Nachr.* 53, *1908; Phys. Z.* 10, *104, 1909.* — **W. Ritz,** *Ann. chim. phys.* 13, *145, 1908; Phys. Z. 903, 1908.* — **Abraham,** *Rend. Circ. Mat. di Palermo* 30, *1910; Beibl.* 34, *1253, 1910.*

H. Scholl.

Elektrokapillarität.

1. Einleitung. Definition und Bedeutung der elektrokapillaren Erscheinungen. 2. Meßmethoden. 3. Theorie der Elektrokapillarkurve: a) Theorie von Lippmann und Helmholtz; b) Theorie von Warburg-Meyer; c) Theorie von Nernst. 4. Theorie der Tropfelektroden: a) Theorie von Helmholtz; b) Theorie von Nernst. 5. Experimentelle Bestätigungen der Theorien von Lippmann-Helmholtz-Nernst: a) an reinem Quecksilber; b) an Amalgamen. 6. Abweichungen von der Theorie: a) der Elektrokapillarkurve; b) der Tropfelektroden. 7. Theorie der Abweichungen von F. Krüger. 8. Gestalt der Elektrokapillarkurve. 9. Folgerungen in bezug auf die Lage des absoluten Nullpunktes der Potentialdifferenz Metall-Lösung: a) aus den Bestimmungen des Maximums der Oberflächenspannung und der Tropfelektrodenpotentiale; b) aus Messungen an Tropfelektroden nach der Nernstschen Nullmethode; c) aus Möllers Messungen des Randwinkels an einer Wasserstoffblase auf festen Metallen; d) aus Krouchkolls Messungen der Dehnungsströme; e) aus Strömungsströmen, den Strömen durch fallende Teilchen, der Wanderung kolloidaler Metalle im elektrischen Felde. f) aus der radioaktiven Methode von G. v. Hevesy. 10. Elektrokapillare Bewegungserscheinungen; Kapillartelephon. 11. Kapillarelektrische Erscheinungen an Quecksilber in nichtwässerigen Lösungsmitteln und an der Grenze zweier Lösungsmittel. 12. Kapillarelektrische Erscheinungen an geschmolzenen Metallen unter geschmolzenen Salzen.

1. Einleitung. Definition und Bedeutung der elektrokapillaren Erscheinungen. Unter Elektrokapillarität versteht man die Beeinflussung der Oberflächenspannung durch elektrische Beladung. Eine solche Beeinflussung ergibt sich aus der elektrostatischen Abstoßung der elektrischen Ladung und ist in manchen Fällen leicht zu beobachten: So sucht sich eine elektrisch geladene Seifenblase auszudehnen, ein geladenes Quecksilbertröpfchen zeigt eine Verkleinerung der Oberflächenspannung usw. Diese Effekte sind jedoch nur klein, da sich große Flächendichten der elektrischen Ladung nicht erzielen lassen. Viel stärker sind die Wirkungen, die aus der elektrischen Ladung der natürlichen Doppelschichten sich ergeben, welche an der Grenze zweier Phasen normalerweise stets vorhanden sind und deren Flächendichten außerordentlich viel größer sind, wie die durch elektrostatische Aufladung zu erhaltenden. Die Abhängigkeit der Oberflächenspannung solcher Grenzflächen von der Flächendichte oder der Potentialdifferenz an denselben bildet den eigentlichen Inhalt der Erscheinungen, welche man unter dem Namen der Elektrokapillarität zusammenfaßt; ihr Interesse besteht darin, daß sie für die Grenzfläche zweier Flüssigkeiten zu den wenigen gut meßbaren Eigenschaften gehören, die eingehendere Schlüsse auf die elektrischen und allgemein physikalisch-chemischen Zustände solcher Grenzflächen gestatten.

Die natürliche Potentialdifferenz einer Flüssigkeit gegen einen Gasraum können wir nicht oder nur schwer beeinflussen, die elektrokapillaren Eigenschaften dieser Grenzflächen kommen daher nicht in Betracht. Die vorliegenden Untersuchungen beschränken sich vielmehr naturgemäß auf die elektrokapillaren Eigenschaften der Grenzfläche zweier Flüssigkeiten, da wir nur diese durch elektrische Polarisation in ihrer Potentialdifferenz beeinflussen können: die Abhängigkeit der Oberflächenspannung der Grenzfläche zweier Flüssigkeiten von der polarisierenden Spannung und die daraus folgenden Schlüsse bilden daher den Hauptinhalt der Lehre von der Elektrokapillarität.

Auch hier ist eine weitere Einschränkung insofern zu machen, als bei der weit überwiegenden Anzahl aller Untersuchungen die eine Flüssigkeit das Quecksilber bildet; das ist damit begründet, daß die Theorie der Potentialdifferenzen zwischen einem Metall und einer Flüssigkeit weitgehend entwickelt ist, während über die Berührungspotentialdifferenzen an der Grenze zweier verschiedener Flüssigkeiten oder Lösungsmittel im allgemeinen noch wenig bekannt ist. Das weitgehende Interesse, das in der großen Anzahl der Arbeiten über Elektrokapillarität zutage tritt, ist aber vor allem begründet in der durch die theoretische Deutung der Elektrokapillarkurve des Quecksilbers, welche die Abhängigkeit der Oberflächenspannung von der polarisierenden elektromotorischen Kraft darstellt, eventuell gegebenen Möglichkeit, den Punkt des Verschwindens der Potentialdifferenz zwischen Quecksilber und dem Elektrolyten,

Digitized by Google

den sogenannten absoluten Nullpunkt der Potentialdifferenz zu bestimmen, der nach der Nernstschen Theorie der elektrolytischen Wirksamkeit der Ionen definiert ist durch die Gleichheit der Lösungstension P des Metalls und des osmotischen Druckes p der Ionen.

2. Meßmethoden. Zur experimentellen Bestimmung der Oberflächenspannung an der Grenzfläche Quecksilber-Elektrolyt dient die in Figur 1 skizzierte Anordnung. Eine in eine feine Spitze auslaufende Kapillare A ist mit Quecksilber gefüllt, dessen Gewicht von der Oberflächenspannung getragen wird: sie taucht in ein mit dem zu untersuchenden Elektrolyten gefülltes Gefäß B, dessen Boden mit Quecksilber von einer im Vergleich zu der kleinen Quecksilberkuppe in der Kapillarenspitze großen Oberfläche bedeckt ist. Das Quecksilber in der Kapillare wird mit dem negativen, die große Quecksilberfläche auf dem Boden mit dem positiven Pol einer Elektrizitätsquelle verbunden, die variable Spannungen abzunehmen gestattet, also mit irgendeiner Potentiometeranordnung oder einem Gefälldraht, Widerstandskasten oder ähnlichem. Die Stellung des Meniskus in der Kapillare wird mit einem Mikroskop beobachtet. Als Elektrolyt mag z. B. verdünnte Schwefelsäure dienen. Legt man nun, von Null anfangend, höhere und höhere Spannungen an die Quecksilberelektroden, so wird der kleine Quecksilbermeniskus in der Kapillare polarisiert, während die Potentialdifferenz an der großen Quecksilberoberfläche unverändert bleibt. Infolge der so veränderten Spannung an dem Meniskus nimmt die Oberflächenspannung der Grenzfläche Quecksilber-Elektrolyt zu, der

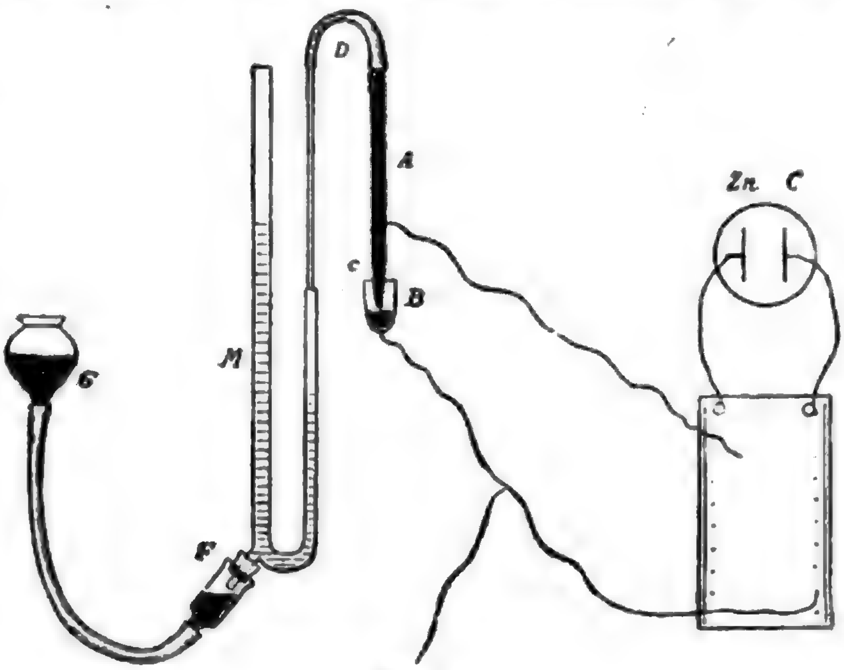


Fig. 1.

Fig. 2.

Meniskus steigt daher in der Kapillare höher. Mit zunehmender Spannung steigt der Meniskus weiter, erreicht ein Maximum, um dann wieder zu sinken. Das Ende der Kurven wird durch eintretende Wasserzersetzung bedingt. Trägt man die Oberflächenspannung des Quecksilbers als Ordinate und die polarisierende Spannung als Abszisse auf, so erhält man etwa eine Kurve, wie sie in Figur 2 wiedergegeben ist und die einer Parabel ähnlich ist; der aufsteigende Ast ist jedoch fast stets steiler als der fallende. Näheres über die Kurvenform soll später gesagt werden. Man beobachtet jedoch für genauere Messungen nicht so, daß man den Ausschlag selbst mißt, sondern man erhöht durch ein verstellbares Quecksilberniveau den auf der Quecksilbersäule lastenden Druck soweit, daß der Meniskus bei jeder polarisierenden Spannung auf derselben Stelle steht und mißt den jeweils dazu erforderlichen Druck, der der Oberflächenspannung proportional ist.

Man nennt ein derartiges Instrument Kapillarelektrometer. Bei geeigneter Anordnung — sehr feiner Kapillare — gewährleistet es einen ziemlich hohen Grad von Genauigkeit und gestattet bis $^1/_{10000}$ Volt abzulesen. Fig. 3 zeigt die Ausführungsform eines Kapillarelektrometers in der vertikalen Form (Lippmann), Fig. 4 ein solches in der horizontalen Form (Ostwald). Letztere ist besonders leicht und billig herzustellen, und wird daher häufig als Nullinstrument zur Messung elektromotorischer Kräfte

usw. benutzt. Seine Kapazität ist jedoch im Vergleich zu der der elektrostatischen Elektrometer recht groß, so daß es für alle Zwecke nicht geeignet ist. Wichtig ist, daß die beiden Elektroden des Kapillarelektro-

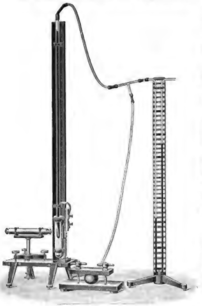


Fig. 3.

meters im unbenutzten Zustande stets kurzgeschlossen sind, um bestehende Potentialdifferenzen auszugleichen. Außer nach dieser Kapillarmethode ist die Oberflächenspannung Quecksilber-Lösung noch gemessen nach einer dynamischen Methode, nämlich mittels Wägung der Tropfen; sie ist weniger bequem, liefert aber ebenfalls gute und mit der ersten Methode übereinstimmende Resultate. Ferner ist auch die Methode der schwingenden Strahlen zur Messung der Oberflächenspannung und zwar von sehr verdünnten Amalgamen benutzt worden. Auch aus dem Krümmungsradius eines Quecksilbertropfens in einer Lösung läßt sich (König) das Maximum der Oberflächenspannung bestimmen.

3. **Theorie der Elektrokapillarität.** 3a) Theorie von Lippman und Helmholtz. Die erste bahnbrechende Aufklärung sowohl in experimenteller wie in theoretischer Hinsicht brachte eine Arbeit von G. Lippmann. Lippmann faßte die polarisierbare Quecksilberelektrode wie einen Kondensator auf und den polarisierenden Strom als einen Ladungsstrom, dessen gesamte Elektrizitätsmenge sich als negative und positive Belegung der Doppelschicht an der Grenzfläche Quecksilber-Elektrolyt auflagert. Mit Hilfe eines thermodynamischen Kreisprozesses leitete er eine Beziehung zwischen der Oberflächenspannung γ und der polarisierenden Spannung E ab, welche lautet

$$\frac{\partial \gamma}{\partial E} = -\varepsilon,$$

worin ε die elektrische Flächendichte der Doppelschicht pro Flächeneinheit bedeutet. Daraus folgt bekanntlich, daß γ ein Maximum ist für $\varepsilon = 0$, d. h. also dann, wenn die Flächendichte der Doppelschicht, also auch die Potentialdifferenz an der Grenze Quecksilber-Elektrolyt selbst gleich Null ist. Helmholtz erweiterte die Theorie und gab vor allem eine anschauliche Deutung der Erscheinung. Beim Maximum der Oberflächenspannung, wo also nach der Theorie die Beladung Null ist, herrscht die natürliche unbeeinflußte Oberflächenspannung Quecksilber-Elektrolyt, vor und hinter dem Maximum ist das Quecksilber positiv respektive negativ geladen und die elektrostatische Abstoßung der Belegung vermindert die Oberflächenspannung. Jedenfalls war nach diesen Theorien in der Bestimmung der polarisierenden Spannung, die zur Erreichung des Maximums der Oberflächenspannung erforderlich ist, ein Mittel gegeben, um den Nullpunkt der Potentialdifferenz Quecksilber-Elektrolyt, den sogenannten absoluten Nullpunkt der Potentialdifferenz zu bestimmen.

3b) Theorie von Warburg-Meyer. Eine wesentlich andere Theorie hat später Warburg gegeben. Er wies vor allem darauf hin, daß die elektromotorische Kraft der

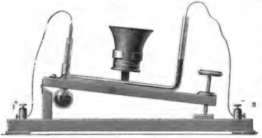


Fig. 4.

Digitized by Google

Polarisation die einer Konzentrationskette sei, daß der polarisierende Strom zum weitaus größten Teil dazu diene, die Konzentration des Quecksilbersalzes, welches sich unter Mitwirkung des Luftsauerstoffes in dem Elektrolyten an der Quecksilberelektrode stets bildet, an der Elektrode zu verändern, also ein sogenannter Leitungsstrom sei, dem gegenüber der Anteil, welcher zum Aufladen der Doppelschicht dient, der Ladungsstrom verschwindend sei, indem die Dicke der Doppelschicht als relativ groß, die Flächendichte also als klein betrachtet wurde. Diese Konzentrationsänderungen des Quecksilbersalzes an der Elektrode, welche kaum eine Aenderung in den Eigenschaften des Elektrolyten bedingen, führen für sich noch nicht zu Aenderungen der Kapillarität der Grenzfläche. Diese ergaben sich für Warburg daraus, daß er auf Grund thermodynamischer Betrachtungen von Gibbs eine Kondensation des Quecksilbersalzes an der Elektrode, also eine größere Dichte desselben an dieser als in der Lösung annahm. Die Tendenz des Salzes, sich auf dem Quecksilber zu kondensieren, führt zu einer Abnahme der Oberflächenspannung, um so stärker, je größer die Verdichtung ist. Die Anwendung der Thermodynamik ergibt das Resultat

$$\frac{\partial \gamma}{\partial E} = -\frac{\Gamma}{\alpha}$$

worin Γ die Oberflächendichte des Salzes, α dessen elektrochemisches Aequivalent bedeutet. γ erreicht seinen größten Wert also für $\Gamma = 0$. Ueber Γ ist bei dieser Ableitung die Annahme gemacht, daß sie nur durch den polarisierenden Strom schnell geändert wird und nur sehr langsam sich mit der Lösung ins Gleichgewicht setzt.

Diese Theorie macht gar keine Aussage über die Lage des absoluten Nullpunktes der Potentialdifferenz, sie führt ohne besondere Annahmen nicht zu einer Deutung des absteigenden Astes der Elektrokapillarkurve. Eine Ergänzung der Warburgschen Theorie in dieser Richtung gab G. Meyer, indem er den absteigenden Ast durch Amalgambildung zu erklären suchte. Hiergegen ist jedoch einmal einzuwenden, daß die Amalgame der hier besonders in Frage kommenden Alkalimetalle, also wenn man z. B. Na_2SO_4-Lösung als Elektrolyt benutzt, wegen der außerordentlich großen Lösungstension der letzteren bei den gewöhnlich angewandten Spannungen nur überaus verdünnt sein können, so daß ihre Oberflächenspannung von der des Quecksilbers kaum verschieden sein wird. Tatsächlich findet man denn auch, wie Gouy zuerst feststellte und neuerdings Christiansen durch besondere Messungen bestätigte, daß die unteren (am stärksten kathodisch polarisierten) Teile des absteigenden Astes in den Lösungen von Salzen mit den verschiedensten Kationen, welche die Amalgame bilden müßten, innerhalb der Messungsfehler zusammenfallen. Wäre also der absteigende Ast durch Amalgambildung zu erklären, so ist nicht einzusehen, warum die verschiedensten Amalgame die gleiche Kurve ergeben sollten. Bei Anwendung von Säuren als Elektrolyte müßte sich ferner ein Wasserstoffamalgam bilden, das aber chemisch nicht bekannt ist. Wesentlich neu und zutreffend ist an der Warburgschen Theorie der Hinweis, daß der polarisierende Strom primär Konzentrationsänderungen an der Elektrode bewirkt, sonst aber gibt sie auf verschiedene Fragen keine befriedigende Antwort.

3c) Theorie von Nernst. Wesentlich verändert wurden die Vorstellungen über die Vorgänge in der Grenzschicht Metall-Elektrolyt durch die Nernstsche Theorie der Lösungstension. Nach ihr ist bekanntlich die Potentialdifferenz Metall-Elektrolyt eine Funktion der Ionenkonzentration. Diese kann sowohl durch Elektrolyse wie rein chemisch durch Ausfällen geändert werden. Durch Zusetzen von Elektrolyten, welche die Ionenkonzentration durch Ausfällen mehr und mehr verringern, muß man wenigstens angenähert die verschiedenen Teile der Elektrokapillarkurve erhalten, was Nernst durch den Versuch bestätigt fand. Ist die Ionenkonzentration gegeben, so stellt sich nach Nernst die ihr entsprechende Potentialdifferenz und damit also auch die ihr entsprechende Doppelschicht mit der zugehörigen elektrischen Flächendichte momentan von selbst ein: Ionenkonzentration, Potentialdifferenz und Flächendichte sind stets im Gleichgewicht. Hiernach ist die primäre Wirkung einer Polarisation der Elektrode eine Konzentrationsänderung, wie dies auch Warburg annahm; die entsprechende Aenderung der Potentialdifferenz und Flächendichte erfolgt von selbst. Der Grund der Verringerung der Oberflächenspannung diesseits und jenseits des Maximums ist nach der Nernstschen Theorie natürlich ganz ebenso wie bei der von Helmholtz, die elektrostatische gegenseitige Abstoßung der geladenen Oberflächenschichten. Aber der Mechanismus der Ausbildung der Potentialdifferenz ist ein anderer, vor allem ist wesentlich, daß nach Lippmann-Helmholtz sich die Flächendichte nur unendlich langsam von selbst ins Gleichgewicht mit der Lösung setzt, daß sie daher nur durch den polarisierenden Strom geändert werden kann, während, wie erwähnt, nach Nernst sich die zu einer bestimmten Konzentration, sei sie durch Polarisation oder chemisch oder sonstwie herbeigeführt, stets die zugehörige

Digitized by Google

Potentialdifferenz und Flächendichte momentan von selbst einstellt.

4. Theorie der Tropfelektroden. 4a) Theorie von Helmholtz. Schon Helmholtz hatte aus seiner Theorie noch einen weiteren Schluß gezogen, nämlich, daß die Ladungsdichte ε, die ja nach seiner Anschauung nur unendlich langsam mit der Lösung sich ins Gleichgewicht setzt, sich bei steter Vergrößerung der Oberfläche mehr und mehr verringern und schließlich der Null nähern müsse, daß also ein tropfende Elektrode die Potentialdifferenz Null gegen die Lösung annehmen müsse. Auf Veranlassung von Helmholtz konnte dann König zeigen, daß in der Tat ein Kapillarelektrometer, dessen Quecksilbermeniskus mit einer Tropfelektrode in derselben Lösung leitend verbunden, also auf dasselbe Potential gebracht war, den dem Maximum der Oberflächenspannung entsprechenden Wert zeigte. Von der so sich ergebenden Möglichkeit, mittels Tropfelektroden den absoluten Nullpunkt der Potentialdifferenz Quecksilber-Elektrolyt zu bestimmen, hat dann besonders Ostwald in weiterem Umfang Gebrauch gemacht.

4b) Theorie von Nernst. Da nach der Nernstschen Theorie der Lösungstension sich die Potentialdifferenz Quecksilber-Elektrolyt stets momentan von selbst herstellt, so könnte es auf den ersten Blick scheinen, als wenn nach ihr eine Tropfelektrode dieselbe Potentialdifferenz gegen die Lösung besitzen müsse wie eine ruhende. Eine nähere Betrachtung zeigt indes, daß dies nicht zutrifft, daß vielmehr auch nach der Nernstschen Theorie eine Tropfelektrode eine Potentialdifferenz annehmen muß, die dem absoluten Nullpunkt unter günstigen Umständen wenigstens nahekommt. Der Mechanismus der Tropfelektrodenwirksamkeit ist nach dieser Theorie jedoch ein völlig anderer. Die Aenderung der Potentialdifferenz ergibt sich nach ihr daraus, daß zur Ausbildung der Doppelschicht, welche der jeweiligen Potentialdifferenz entspricht, Ionen der Lösung entzogen werden. Dadurch wird die Lösung in der Nähe der Tropfelektrode z. B. in einer Merkurosulfat enthaltenden Schwefelsäurelösung allmählich immer verdünnter werden, ein Vorgang, der sich solange fortsetzen müßte, bis die Lösung an der Tropfelektrode so verdünnt geworden ist, daß sich keine Doppelschicht mehr bildet, bis also die Tropfelektrode keine Potentialdifferenz gegen die Lösung mehr zeigt. Freilich werden Diffusion und Konvektion die durch die Tropfelektrodenwirkung fortgenommenen Ionen zum Teil ergänzen, doch lassen sich diese störenden Wirkungen durch geeignete Anordnungen sehr klein machen. Dort, wo die Wiedervereinigung der Quecksilbertropfen stattfindet, muß nach der Theorie natürlich umgekehrt eine Konzentrationsvermehrung stattfinden.

5. Experimentelle Bestätigungen der Theorie von Lippmann-Helmholtz-Nernst. 5a) An reinem Quecksilber. Die Lippmann-Helmholtzsche Theorie, respektive die Nernstsche Modifikation derselben wurde zunächst in mannigfacher Hinsicht gut bestätigt: Das Maximum der Oberflächenspannung war in einer großen Zahl von Lösungen sehr nahe gleich groß; die Differenz der Spannungen, welche das Quecksilber in verschiedenen Elektrolyten zum Maximum der Oberflächenspannung polarisiert, er wies sich gleich der elektromotorischen Kraft einer aus Quecksilberelektroden in diesen Lösungen gebildeten Kette; die Tropfelektrode zeigte dasselbe Potential wie eine zum Maximum der Oberflächenspannung polarisierte Elektrode, wenigstens wenn der von Paschen, der sich um die Tropfelektrodenmessungen besonders verdient gemacht hat, angewandte Kunstgriff beachtet wurde, den Berührungspunkt der tropfenden Elektrode mit dem Elektrolyten durch Verlegung ihres Zerreissungspunktes in die Flüssigkeitsoberfläche zur Herabsetzung der schädlichen Wirkung der Diffusion möglichst klein zu machen. Die speziellere Nernstsche Theorie der Tropfelektroden wurde von Palmaer mittels der in Figur 5 skizzierten Anordnung schlagend bestätigt, der nachwies, daß die Lösung in der Nähe der Tropfelektrode verdünnter, und dort, wo die Tropfen sich wieder vereinigen, konzentrierter wird. Die Folgerung, daß in einer Lösung, in welcher der osmotische Druck der Ionen kleiner ist als die Lösungstension des Quecksilbers, umgekehrt die Tropfelektrode selbst positiver als das ruhende Quecksilber ist entsprechend der jetzt an jener stattfindenden Konzentrationsvermehrung, hatte bereits Paschen in konzentrierter Cyankaliumlösung bestätigt gefunden. Quecksilberionen sind in der Nähe der Quecksilberelektroden auch in den reinen Säure- und Alkalimetallsalzlösungen stets vorhanden, da sie sich, wie bereits Warburg zeigte, unter Mitwirkung des Luftsauerstoffs durch Auflösen des Quecksilbers schnell bilden. In mancher Hinsicht definierter sind natürlich die Verhältnisse, wenn von vornherein etwas Quecksilbersalz, z. B. Merkurosulfat zu Schwefelsäure, zugesetzt wird. Ein größerer Zusatz

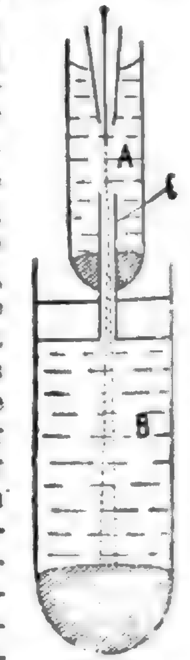


Fig. 5.

Digitized by Google

an Quecksilberionen ändert jedoch die Erscheinungen insofern, als die notwendige Voraussetzung derselben, die leichte Polarisierbarkeit der Quecksilberelektrode, dann nicht mehr zutrifft; dies stört einerseits die einwandfreie Reproduzierung der Elektrokapillarkurven, da die polarisierenden Ströme leicht zu stark werden, vor allem aber die Wirksamkeit der Tropfelektroden. Das ist z. B. in einer konzentrierten Merkuronitratlösung in so hohem Maße der Fall, daß die Tropfelektrode fast überhaupt keine Potentialdifferenz gegen die ruhende Elektrode mehr zeigt, da infolge der hohen Quecksilberionenkonzentration durch Diffusion und Konvektion die durch die Doppelschichtenbildung an den Tropfen fortgeführte Ionenmenge leicht und völlig ersetzt wird.

5b) Experimentelle Bestätigungen der Theorien von Lippmann-Helmholtz-Nernst an Amalgamen. Da wir kein zweites bei gewöhnlicher Temperatur flüssiges Metall besitzen, so war die überaus wünschenswerte Kontrolle der Bestimmung des absoluten Nullpunktes an anderen Metallen nicht ausführbar Bekanntlich aber zeigen schon sehr verdünnte Amalgame die Potentiale der reinen Metalle; an solchen Amalgamen von Wasser nicht zersetzenden, aber unedler als Quecksilber sich verhaltenden Metallen war daher durch Bestimmung des Maximums der Oberflächenspannung eine Prüfung möglich, die auch, wie Rothmund zeigte, an Amalgamen von Kupfer, Wismut und Blei eine gute Bestätigung ergab.

6. Abweichungen von der Theorie. 6a) Abweichungen von der Theorie der Elektrokapillarkurve. In den Lösungen der typischen Salze und Säuren zeigt sich also die Lippmann-Helmholtz-Nernstsche Theorie gut bestätigt; dagegen fanden zuerst Rothmund und später G. Meyer erhebliche Abweichungen, als sie Komplexsalzlösungen untersuchten. Die Differenz der Spannungen e_1 und e_2, welche Quecksilber in zwei verschiedenen Lösungen mit natürlich auch verschiedener Quecksilberionenkonzentration zum Maximum der Oberflächenspannung polarisieren, sollte theoretisch gleich der elektromotorischen Kraft E des galvanischen Elementes sein, das aus Quecksilberelektroden in diesen beiden Lösungen gebildet ist. Dies fand sich nun, wie die folgende Tabelle zeigt, durchaus nicht mehr bestätigt, wenn die eine der Lösungen die eines Komplexsalzes war:

Galvanische Elemente	$e_1 - e_2$	e_2	E	E — $(e_1 - e_2)$
Hg | KCl | KCNS | Hg	—0,028	0,156	0,148	0,146
Hg | KCl | KJ | Hg	0,122	0,284	0,390	0,226
Hg | KCl | Na_2S | Hg	0,561	0,365	0,983	0,416

In den Komplexsalzlösungen von KCNS, KJ und Na_2S verhält sich also das Quecksilber durchaus anormal; wie die letzte Kolumne zeigt, sind die Differenzen der elektromotorischen Kräfte der Elemente und der Differenz der Einzelpotentialdifferenzen, die sich aus dem Maximum der Oberflächenspannung ergeben, sehr beträchtlich, während sie gleich Null sein sollten. Ferner hat das Maximum der Oberflächenspannung selbst in diesen Lösungen nicht den normalen Wert, den es in den gewöhnlichen Lösungen zeigt, sondern ist um so mehr erniedrigt, je stärker komplex das betreffende, die Lösung bildende Salz ist. Man übersieht diese Verhältnisse am besten, wenn man, wie das Gouy getan hat, die Elektrokapillarkurven der verschiedenen Salzlösungen so übereinander zeichnet, daß sie auf die gleiche Potentialdifferenz des Quecksilbers gegen die Lösung bezogen sind; verhielte sich dann alles normal, so müßten die Maxima alle an derselben Stelle liegen und gleich hoch sein. Wie bereits erwähnt und die folgende Figur 6 deutlich zeigt, ist dies bei den Komplexsalzlösungen nun keineswegs der Fall. Das

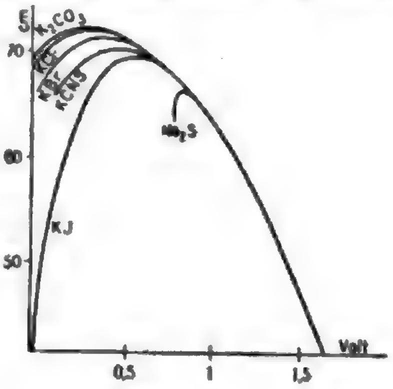


Fig. 6.

Maximum in diesen Lösungen ist stark erniedrigt und nach der kathodischen Seite hin verschoben. Die Versuche sind angestellt in einer zehnprozentigen K_2CO_3-Lösung, der an der kleinen Elektrode (Kapillare) je nur 1% KCl, KBr, KCNS, Na_2S zugesetzt war, während die Lösung an der großen Elektrode (Anode) unverändert blieb. Die Rb- und Cs-Salze verhalten sich ebenso, maßgebend ist also nur das komplexbildende Anion. Auffallend ist zunächst das völlige Zusammenfallen des unteren Teiles des abfallenden Zweiges der Kurven bei starker kathodischer Polarisation, das, wie schon erwähnt, durchaus gegen die Amalgamtheorie von G. Meyer spricht. Die Abweichungen vom normalen Kurvenverlauf zeigen sich erst in der Nähe des Maximums, und um so früher, je stärker komplex das die Lösung bildende Salz ist. In den Lösungen der ty-

pischen Salze und Säuren fallen die Kurven von der kathodischen Seite an gerechnet bis über das Maximum hinaus sehr angenähert zusammen. Es kann hiernach keinem Zweifel unterliegen, daß nicht immer beim Maximum der Oberflächenspannung die Potentialdifferenz Null herrscht; nimmt man, was das plausibelste ist, an, daß in den Lösungen der typischen Salze und Säuren, in denen die Oberflächenspannung beim Maximum dieselbe ist und bei denen sich aus der Differenz der zur Hervorbringung des Maximums der Oberflächenspannung erforderlichen Potentiale die elektromotorische Kraft der betreffenden Kette richtig berechnen läßt, wirklich der Theorie entsprechend beim Maximum die Potentialdifferenz Null herrscht, so ist das Quecksilber beim Maximum der Oberflächenspannung in den Lösungen von KCNS, KJ und Na_2S in zunehmendem Grade negativ geladen.

6b) Abweichungen von der Theorie der Tropfelektroden. Ganz analoge Abweichungen von der Theorie zeigen auch die Tropfelektroden in den Lösungen komplexer Salze. Da nach der Theorie an einer Tropfelektrode in jeder Lösung stets die Potentialdifferenz Null gegen die Lösung herrschen sollte, sollten zwei Tropfelektroden in zwei verschiedenen Lösungen keine, oder höchstens jene kleinen Potentialdifferenzen gegeneinander zeigen, welche an der Berührungsstelle zweier verschiedener Salzlösungen bestehen und die, nach der Nernstschen Theorie exakt berechenbar, meistens nur wenige Hunderstel Volt betragen. Untersuchen wir aber eine Tropfelektrode in einer Komplexsalzlösung, so zeigt sie gegen eine solche in einer normalen Lösung eine Potentialdifferenz bis zu mehreren Zehntel Volt, die also weit die möglicherweise an den Berührungsstellen der beiden Lösungen vorhandenen Potentialdifferenzen überschreitet. Die Potentialdifferenzen solcher Tropfelektroden in den genannten Lösungen sind unter e_2 in die vorige Tabelle mit aufgenommen. Diese starken Abweichungen liegen nicht etwa in dem Sinne, daß die Tropfelektroden in den Komplexsalzlösungen wegen zu geringer Polarisierbarkeit infolge starker Diffusion, etwa wie in dem oben erwähnten Falle der Merkuronitratlösung, nicht völlig entladen würden, sondern vielmehr im entgegengesetzten Sinne: sie sind negativ geladen gegen die Tropfelektroden in den normalen Lösungen.

Am auffallendsten aber ist, daß diese Potentialdifferenzen der Tropfelektroden in den Komplexsalzlösungen gegen die in den normalen Lösungen fast genau dieselben Werte haben, wie die Abweichung der Differenz der Einzelpotentiale, aus dem Maximum der Oberflächenspannung bestimmt, von der elektromotorischen Kraft der zugehörigen galvanischen Kette, wie der Vergleich der dritten Kolumne für e_2 mit der fünften für $E-(e_1-e_2)$ in voriger Tabelle deutlich zeigt. Dies bedeutet mit anderen Worten, daß eine Tropfelektrode stets diejenige Potentialdifferenz gegen die Lösung besitzt, welche beim Maximum der Oberflächenspannung des Quecksilbers in derselben Lösung herrscht. Das weist deutlich darauf hin, daß der Grund für das abweichende Verhalten der Elektrokapillarkurven einerseits und der Tropfelektroden andererseits in den Komplexsalzlösungen derselbe sein muß und gibt somit ein Regulativ für die Aufstellung von Theorien, welche diese Anomalien erklären wollen.

7. **Theorie der Abweichungen von F. Krüger.** Nernst wies bereits in seinem Referat über Berührungselektrizität darauf hin, daß diese Abweichungen mit der rein elektrischen Doppelschichtentheorie im Widerspruch ständen. Später vermuteten er und auch andere, daß mehr chemische Wirkungen der die Doppelschicht bildenden, in verschiedenen Elektrolyten verschiedenen Ionen die Oberflächenspannung beeinflussen könnten. Dieser Einfluß müßte jedoch beim absoluten Nullpunkt, wo die Doppelschicht verschwindet, fortfallen, die Oberflächenspannung müßte also in diesem Punkte in allen Elektrolyten gleich sein oder die Elektrokapillarkurven müßten sich in diesem Punkte schneiden, was nicht der Fall ist. Diese Schwierigkeiten, welche sich aus den Beobachtungen an Komplexsalzlösungen ergaben, existieren natürlich nicht für die Warburgsche Theorie, da sie keinerlei Aussage über die Lage des absoluten Nullpunktes der Potentialdifferenz macht. Sie gibt jedoch keineswegs ein sehr befriedigendes Bild der Erscheinungen, da die große Reihe der oben erwähnten und mit der Doppelschichtentheorie in Einklang stehender Gesetzmäßigkeiten nach ihr als rein zufällig, wenn nicht als auffällig sich erweisen, und für sie ja außerdem die Schwierigkeit der Erklärung des absteigenden Astes der Elektrokapillarkurve besteht.

Nun haben allerdings die eingehenden und zahlreichen Messungen von Gouy gezeigt, daß Zusätze besonders von organischen Substanzen die Oberflächenspannung der Grenzfläche Quecksilber-Lösung beeinflussen können und sowohl das Maximum derselben zu erniedrigen wie auch in selteneren Fällen zu erhöhen und auch zu verschieben vermögen, überhaupt die Form der Elektrokapillarkurve wesentlich zu beeinflussen imstande sind. Allein es ist durchaus unwahrscheinlich, daß derartige direkte, wie man sie vielleicht nennen könnte, Beeinflussungen der Oberflächenspannung in dem besonders interessierenden Falle der

by Google

Komplexsalzlösungen vorliegen. Es ist nämlich nicht einzusehen, wie durch eine derartige Wirkung auch eine Beeinflussung der Tropfelektrodenwirksamkeit, die mit der Oberflächenspannung selbst nur wenig zusammenhängt, resultieren sollte, und noch weniger, wie die erwähnte durchgehende Uebereinstimmung der Abweichungen bei den Tropfelektroden und bei der Oberflächenspannung herauskommen sollte. Diese letztere auffallende Gesetzmäßigkeit ergibt sich nun aber in einfacher Weise aus einer von F. Krüger zur Erklärung der Anomalien in den Komplexsalzlösungen aufgestellten Theorie, welche in gewissem Sinne eine Vereinigung der unter Berücksichtigung der Nernstschen Theorie der Lösungstension veränderten Lippmann-Helmholtzschen und der ein wenig modifizierten Warburgschen Theorie darstellt. Verschiedene Gründe, besonders die nähere Betrachtung der Tropfelektrodenwirkung machen nämlich in der Tat die Gibbs-Warburgsche Annahme einer größeren Dichte des Salzes auf der Elektrodenoberfläche wahrscheinlich; diese führt, wie bereits oben ausgeführt, zu einer Verminderung der Oberflächenspannung. Nur wird im Gegensatz zu Warburg angenommen, daß die Kondensation des Salzes auf der Quecksilberoberfläche momentan erfolgt. Beide Wirkungen, die elektrische und die Kondensationswirkung superponieren sich und es ergibt sich so an Stelle der Lippmannschen Gleichung die erweiterte

$$\frac{\partial \gamma}{\partial E} = -\varepsilon - F(\varkappa - 1)c \,.\, \delta x,$$

worin $\varkappa$ den der Kondensation Rechnung tragenden Verteilungskoeffizienten des Quecksilbersalzes in der Grenzschicht, δx die Dicke der Kondensationsschicht, F die mit einem Gramm-Aequivalent wandernde Elektrizitätsmenge und c die Quecksilberionenkonzentration in der Nähe der Quecksilberoberfläche in der Kapillare bedeutet. Danach ist also das Maximum der Oberflächenspannung vorhanden oder $\frac{\partial \gamma}{\partial E} = 0$, nicht wenn $\varepsilon = 0$ ist, sondern wenn $\varepsilon = -F(\varkappa - 1) \cdot c\,\delta x$, wenn die elektrische Flächendichte mit umgekehrtem Zeichen der Kondensationsdichte gleich ist. Das heißt, das Maximum der Oberflächenspannung ist vorhanden, wenn bei Dehnung der Oberfläche keine Konzentrationsveränderung an der Elektrode auftritt, wenn bei der Dehnung die Konzentrationsverminderung infolge der Kondensation gerade kompensiert wird durch die Konzentrationsvermehrung infolge der Doppelschichtenausbildung; eine Vermehrung infolge der letzteren kann aber, wie oben erwähnt, nur jenseits des absoluten Nullpunktes eintreten, wo der osmotische Druck der Ionen p kleiner ist als die Lösungstension P des Quecksilbers. Das Maximum der Oberflächenspannung liegt also nicht genau beim Nullpunkt der Potentialdifferenz, sondern mehr oder weniger jenseits desselben nach der kathodischen Seite zu; wie weit jenseits, wird davon abhängen, wie groß die in der betreffenden Lösung kondensierte Quecksilbersalzmenge ist. Es läßt sich auch plausibel machen, obschon dieser Punkt noch einer tieferen Klärung bedarf, daß die Kondensation und damit die Abweichungen mit zunehmender Komplexität des Salzes zunehmen. Daß das Maximum, das nun nicht mehr bei dem Nullpunkt der Potentialdifferenz liegt, erniedrigt sein muß, ist ja ohne weiteres klar. Das wesentlichste Ergebnis dieser Theorie aber ist die Erklärung dafür, daß die Tropfelektroden dasselbe Potential annehmen wie die zum Maximum der Oberflächenspannung polarisierten Elektroden: denn nach ihr wird dann keine Konzentrationsänderung an einer Tropfelektrode mehr auftreten, wenn die Konzentrationsverminderung durch Kondensation kompensiert wird durch die Konzentrationsvermehrung durch die Doppelschichtenbildung jenseits des absoluten Nullpunktes. Das ist aber ersichtlich dieselbe Bedingung, die für das Maximum der Oberflächenspannung gefunden war; die Tropfelektrode nimmt daher stets das Potential des Maximums der Oberflächenspannung an, zeigt daher wie dieses in den Lösungen der am stärksten komplexen Salze die stärksten Abweichungen. Durch hinreichend starke kathodische Polarisation wird auch in den Lösungen der stärksten Komplexsalze der Einfluß der Kondensation auf die Oberflächenspannung verschwindend klein gegenüber der elektrostatischen Wirkung der Doppelschicht; da diese letztere für alle Elektrolyte gleich ist, so fallen in diesem Gebiete alle Kurven zusammen. In den verdünnten Lösungen der typischen Salze und Säuren ist dies der Fall auch noch beim Maximum der Oberflächenspannung, hier fehlt noch der störende Einfluß der Kondensation, daher auch die gleiche Höhe des Maximums. Es erscheint daher der ursprünglich, besonders von Ostwald, verteidigte Schluß als zulässig, daß in diesen Lösungen beim Maximum der Oberflächenspannung tatsächlich der absolute Nullpunkt der Potentialdifferenz Quecksilber-Elektrolyt liegt. Das Hauptresultat dieser Theorie der Abweichungen, nämlich die Erklärung der Uebereinstimmung der Abweichungen in den Elektrokapillarkurven und bei den Tropfelektroden erscheint wesentlich an die Annahme gebunden, daß die Anomalien durch Kondensation des Salzes bedingt sind, nicht

Digitized by Google

aber durch eine direkte chemische Beeinflussung der Oberflächenspannung; eine solche dürfte vielmehr die Uebereinstimmung der Abweichungen notwendig zerstören.

8. Gestalt der Elektrokapillarkurve. Eine Integration der Lippmannschen Gleichung $\frac{\partial \gamma}{\partial E} = -\varepsilon$ ist nur möglich, wenn man den Zusammenhang zwischen der Potentialdifferenz E und der Flächendichte ε kennt. Indem Lippmann die Elektrode einfach wie einen Kondensator auffaßte, setzte er $C = \frac{\varepsilon}{E}$, worin C die Kapazität bedeutet und erhielt so $\gamma = \gamma_{max.} - \frac{C}{2} \cdot E^2$, also als Gestalt der Elektrokapillarkurve die Parabel, die symmetrisch zu dem durch das Maximum gehenden Wert liegt. Die neueren Untersuchungen über Polarisationskapazität lassen diesen einfachen Zusammenhang zunächst kaum erwarten, die Polarisierbarkeit einer Elektrode ist danach ein komplizierterer Vorgang, wie oben bereits angedeutet; die primäre Wirkung des polarisierenden Stromes besteht darin, daß eine Konzentrationsänderung an der Elektrode eintritt, welcher die zu der damit verbundenen Aenderung der Potentialdifferenz gehörige Aenderung der Flächendichte der Doppelschicht von selbst nachfolgt. Diese entzieht aber, wie bereits oben auseinandergesetzt, Ionen der Lösung, die also auch durch den polarisierenden Strom ergänzt werden müssen; dieser zerfällt also in einen Leitungsstrom, der die Konzentrationsänderungen bewirkt, und einen Ladungsstrom zur Ausbildung der Doppelschicht. Jedenfalls ist die Kapazität durch beide Anteile bedingt. Wie eine nähere Rechnung zeigt, kommt aber der erstere Anteil für die Aenderung der Oberflächenspannung nicht in Betracht, ein Resultat, das vorauszusehen war, da die Konzentrationsänderung an und für sich in den normalen Lösungen noch keine Aenderung der Oberflächenspannung herbeiführen wird. Für diese ist vielmehr ausschließlich der Ladungsstrom und also die Doppelschichtenkapazität ausschlaggebend, was formal durchaus der ursprünglichen Lippmannschen Theorie und physikalisch natürlich der einfachen Helmholtzschen Deutung der Beeinflussung der Oberflächenspannung durch die elektrostatische Abstoßung entspricht. Durch die Untersuchungen über Polarisationskapazität ist die Existenz dieser Doppelschichtenkapazität direkt erwiesen; da wir ihre Größe auch als im wesentlichen unabhängig von der vorhandenen Potentialdifferenz ansehen können, so wäre also auch im Sinne der neueren Theorie als Gestalt der Elektrokapillarkurve die Parabel zu erwarten. Die experimentellen Ergebnisse schienen jedoch diesei Schlußfolgerung zu widersprechen, denn die bisherigen Messungen gaben in keinem Falle eine hinreichende Annäherung der Kurve an die Form der Parabel, wenn sie sich ihr auch in den Lösungen der typischen Salzen und Säuren einigermaßen nähern. Es ist jedoch F. Krüger und H. Krumreich neuerdings gelungen, in Merkuronitrat einen Elektrolyten zu finden, der den Idealfall der Parabel mit einer Annäherung von wenigen Prozent im ganzen Verlauf der Kurve wiedergibt; in diesem Falle kann man also die Doppelschichtenkapazität mit erheblicher Sicherheit berechnen, die sich nach der Lippmannschen Gleichung zu etwa 26 Mikrofarad ergibt. In allen übrigen Lösungen weicht die Gestalt der Elektrokapillarkurve von der Parabel ab, am wenigsten in den Lösungen der typischen Salze und Säuren und um so stärker, je komplexer die Salze der Lösungen sind. In diesen Lösungen anorganischer Salze fällt stets der ansteigende Ast (der am schwächsten kathodisch polarisierte) steiler ab, als der absteigende, mit zunehmender Komplexität der Salze in steigendem Maße. Ferner ist in diesen Lösungen das Maximum um so mehr gegenüber dem in den normalen Lösungen erniedrigt, je komplexer die Salze sind; nur bei einigen wenigen Salzen finden sich schwache Erhöhungen. Die Lösungen der organischen Stoffe, von denen Gouy viele untersucht hat, verhalten sich abweichend und zeigen sehr mannigfaltige Kurven, hier spielen vermutlich direkte chemische Beeinflussungen eine Rolle; Tropfelektroden sind in diesen Lösungen noch kaum untersucht, weshalb hier nicht näher auf diese Kurven eingegangen werden soll. In den Lösungen der anorganischen Salze sind dagegen nach dem obigen die Abweichungen von der reinen Parabelgestalt im wesentlichen durch die die Oberflächenspannung erniedrigende Kondensation der Quecksilbersalze auf der Quecksilberoberfläche zurückzuführen. Daß, wie schon erwähnt, die stark kathodisch polarisierten Teile des absteigenden Astes in allen Lösungen anorganischer Salze sich zur Deckung bringen lassen, ist leicht zu verstehen, da in diesem Teil die Quecksilberionenkonzentration und damit die Kondensation des Salzes so gering ist, daß ihr Einfluß gegenüber dem der Doppelschichtenbildung völlig zurücktritt, so daß dieser Teil der Kurve also ein Stück der idealen Parabel repräsentiert. Durch die Tatsache, daß wenigstens in einem Falle, in Merkuronitratlösung die Parabelgestalt der Elektrokapillarkurve realisiert ist, entfallen alle die Theorien, welche, wie z. B. die von van Laar, die gewöhnlichen Ab-

Digitized by Google

weichungen von der Parabelform nicht in sekundären Ursachen wie eben der Kondensation des Quecksilbersalzes, sondern in einer prinzipiellen Vernachlässigung der Lippmann-Helmholtzschen Formulierung suchen. Der polarisierende Reststrom ist nur in recht weiten Kapillaren und in recht konzentrierten Quecksilbersalzlösungen so groß, daß das Produkt Stromstärke mal Widerstand neben der polarisierenden Spannung merklich wird und eine scheinbare Entstellung der Elektrokapillarkurve bewirkt.

9. Folgerungen in bezug auf die Lage des absoluten Nullpunktes der Potentialdifferenz Metall - Lösung. 9a) Bestimmungen des Maximums der Oberflächenspannung und der Tropfelektrodenpotentiale. Aus dem Verlauf der Elektrokapillarkurven einerseits und dem Verhalten der Tropfelektroden andererseits ergeben sich hiernach folgende Schlüsse in bezug auf die Lage des absoluten Nullpunktes. Wie immer man die Anomalien auch deuten will, jedenfalls scheint aus den Elektrokapillarkurven mit Sicherheit hervorzugehen, daß sich über die reine Erscheinung der elektrostatischen Wirkung der Doppelschicht, abgesehen von dem Idealfalle in der Merkuronitratlösung, im allgemeinen eine Störung superponiert, zunehmend mit der Konzentration und stärker bei den komplexen Salzen, und es fragt sich nur, ob auch in verdünnter H_2SO_4 oder HCl diese Störung noch beim Maximum der Oberflächenspannung vorhanden ist, oder, auf dem ansteigenden Aste schon vorher verschwindend klein werdend, nicht bis dort heran reicht. Diese Frage ist nun mit größter Wahrscheinlichkeit zu bejahen, da einmal das Maximum in diesen Lösungen nahezu genau denselben Wert besitzt, die Kurven also vom absteigenden Ast an gerechnet bis über das Maximum hinaus zusammenfallen, ferner die Differenz der zur Erreichung des Maximums erforderlichen Spannungen gleich der elektromotorischen Kraft der Kette aus diesen Lösungen ist, und Tropfelektroden in diesen Lösungen keine oder nur die geringen Potentialdifferenzen gegeneinander zeigen, welche den kleinen Potentialdifferenzen an der Berührungsstelle der Lösungen entsprechen. Ferner sprechen die mit den verdünnten Amalgamen einiger Metalle aufgenommenen Elektrokapillarkurven, wie bereits erwähnt, mit Entschiedenheit für diese Annahme. Somit ist der in verdünnten Lösungen nicht komplexer Säuren und Salze aus den Elektrokapillarkurven oder mittels Tropfelektroden bestimmte absolute Nullpunkt der Potentialdifferenz innerhalb der Grenzen der Meßgenauigkeit, d. h. etwa $\frac{1}{100}$ Volt, als der richtige anzusehen; die aus den Elektrokapillarkurven erhaltenen Werte sind jedoch als die genaueren zu betrachten, da die Tropfelektroden nur bei sehr genauer Einstellung völlig entladen werden. Der Wert dieses sogenannten absoluten Potentials beträgt für eine Quecksilberelektrode bei 18° in normaler KCl-Lösung — 0,56 Volt, in einer $^1/_{10}$ normalen KCl-Lösung — 0,612 Volt.

9b) Messungen an Tropfelektroden nach der Nernstschen Nullmethode. Die prinzipielle Gefahr, daß die Tropfelektroden infolge des Einflusses der Diffusion und Konvektion leicht nicht völlig entladen werden und damit einen falschen Wert für den absoluten Nullpunkt ergeben, läßt sich nach einem Vorschlag von Nernst, den zuerst Amelung und später eingehender Palmaer realisiert hat, dadurch umgehen, daß man durch allmähliches Verdünnen diejenige Lösung aufsucht, in denen die Tropfelektrode keine Potentialdifferenz gegen die ruhende mehr zeigt, also eine Art Nullmethode anwendet. Nach der ursprünglichen, einfachen Theorie sollte dann natürlich in dieser Lösung der osmotische Druck p der Ionen gleich der Lösungstension P des Quecksilbers sein, womit also der absolute Nullpunkt bestimmt wäre. Palmaer glaubte nach dieser Methode in KCN- und H_2S-Lösungen den absoluten Nullpunkt einwandfrei zu — 0,574 Volt für die $\frac{1}{10}$ normal KCl-Elektrode bestimmen zu können; aber schon die Versuche von Amelung zeigten und besonders deutlich später solche von Smith und Moss, daß auch durch diese Methode in den jeweiligen Lösungen stets dieselben Werte erhalten werden, welche sich aus dem Maximum der Oberflächenspannung und mittels der gewöhnlichen Tropfelektrode ergeben, daß also diese Nullmethode keine Vorteile gegenüber den anderen bietet. Daraus geht mit Sicherheit hervor, daß für die Abweichungen der Tropfelektrode, wie schon oben hervorgehoben, unvollständige Entladung durch Diffusion nicht der Grund sein kann, wogegen ja auch schon der Sinn der Abweichungen spricht. Nach der oben geschilderten Theorie der Anomalien ist das Versagen dieser Nullmethode ohne weiteres zu verstehen, denn nach ihr hört ja die Wirksamkeit der Tropfelektrode bei derjenigen Konzentration auf, in welcher die Konzentrationsverminderung durch Kondensation gerade kompensiert wird durch die Konzentrationsvermehrung durch die Doppelschichtenbildung, so daß die Nullmethode ganz denselben Wert ergeben muß wie die gewöhnliche Tropfelektrodenmethode und die Anwendung der Elektrokapillarkurven.

9c) H. G. Möllers Messungen des Rand-

winkels an einer Wasserstoffblase auf festen Metallen. Die Annahme, daß der aus dem Maximum der Oberflächenspannung des Quecksilbers in normalen Lösungen bestimmte absolute Nullpunkt der richtige sei, wird noch gestützt durch Versuche von H.G. Möller, der den Randwinkel zwischen einer auf Quecksilber oder anderen festen Metallen ruhenden Wasserstoffblase und einer Elektrolytlösung maß. Er zeigte zunächst beim Quecksilber, daß dieser Randwinkel α (s. Fig. 7) bei demselben Poten-

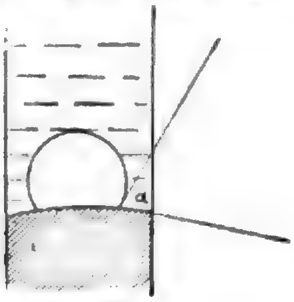


Fig. 7.

tial einen maximalen Wert zeigt wie die Oberflächenspannung Quecksilber-Elektrolyt. Dann nahm er auch die Randwinkel- und Polarisationskurven bei den Metallen Nickel, Kupfer und Silber in 0,1 normaler Schwefelsäure auf; aus dem Maximum des Randwinkels ergaben sich dann in allen drei Fällen Werte für den absoluten Nullpunkt der Potentialdifferenz, die mit dem aus der Oberflächenspannung des Quecksilbers bestimmten und für diese Metalle umgerechneten, recht gut übereinstimmen. Die Messungen geben also eine gute Bestätigung für die Richtigkeit des Lippmann-Helmholtzschen Nullpunktes, wenn es auch höchst wünschenswert erscheint, daß diese Versuche wiederholt und erweitert werden möchten.

9d) Krouchkolls Messungen über Dehnungsströme. Diese Methode ist ebenfalls dadurch ausgezeichnet, daß sie auch Messungen an festen Metallen gestattet, deren Oberflächenspannung wir sonst nicht direkt bestimmen können. Es gibt nämlich Effekte, die ohne die Messung der Oberflächenspannung einen Schluß auf das Vorzeichen der Ladung an der Grenzfläche Metall-Lösung und also auch auf deren Nullpunkt gestatten. Derartige Erscheinungen sind von Krouchkoll aufgefunden und näher untersucht worden; sie bestehen vor allem in der Beobachtung, daß beim Dehnen einer festen Grenzfläche, z. B. eines Drahtes, eine Ladungs- und also auch Potentialänderung des gedehnten Metalls gegenüber einem ungedehnten in derselben Lösung eintritt. Die Erklärung besteht darin, daß, ähnlich wie bei der Bildung eines Quecksilbertropfens, eine frische Grenzfläche gebildet wird, an der die Doppelschichtenausbildung und somit Konzentrations- und Potentialdifferenzänderungen eintreten. Polarisiert man den gedehnten Draht, so wird bei einer bestimmten Polarisation kein Dehnungsstrom mehr auftreten, bei noch stärkerer Polarisation kehrt sich das Vorzeichen des Dehnungsstromes um. Bei Quecksilber, dessen Meniskus vergrößert und verkleinert wurde, hatte bereits Pellat diese Ströme, ihre Umkehrung und denselben Nullpunkt wie bei den Tropfelektroden erhalten. Die Versuchsanordnung Krouchkolls, der Silber-, Kupfer- und Bleidrähte untersuchte, zeigt die Figur 8; ein gespannter Draht wird durch einen Hebel gedehnt, der Draht wird mit Hilfe einer größeren unpolarisierbaren Elektrode polarisiert und die Dehnungsströme gegen eine dritte Bezugselektrode gemessen. So ließ sich in der Tat eine Umkehr des Dehnungsstromes feststellen, leider aber sorgte Krouchkoll nicht für eine definierte Ionenkonzentration, sodaß seine Messungen keinen quantitativen Schluß auf die Lage des absoluten Nullpunktes gestatten; qualitativ scheinen seine Versuche jedoch mit dem Lippmann-Helmholtzschen Nullpunkt durchaus in Uebereinstimmung zu stehen. Jedenfalls liegt hier eine Methode vor, deren gute Verwendbarkeit zur Bestimmung des absoluten Nullpunktes kaum zweifelhaft zu sein scheint.

9e) Strömungsströme, Ströme durch fallende Teilchen, Wanderung kolloidaler Metalle im elektrischen Felde. Für die Bestimmung des absoluten Nullpunktes an der Grenze fester Metalle und Lösungen kommen schließlich noch die Erscheinungen der sogenannten Strömungsströme, der Ströme durch fallende Teilchen und der Wanderung suspendierter, respektive kolloidaler Metalle in Frage. Strömungsströme erhält man, wenn man eine Flüssigkeit durch eine Kapillare, in unserem Falle also z. B. aus Silber strömen läßt; es

Fig. 8.

zeigen dann die auf beiden Seiten der Kapillare angebrachten Elektroden Potentialdifferenzen gegeneinander. Als Vorrichtung zur Messung der Ströme durch fallende Teilchen dient einfach ein mit der betreffenden Flüssigkeit gefülltes Glasrohr, in dessen Achse man die Metallteilchen fallen läßt und an dem an seitlichen Ansätzen in verschiedenen Distanzen Elektroden angebracht sind, die beim Fallen der Teilchen in der Röhre Potentialdifferenzen anzeigen. Wanderung der in einer möglichst wenig leitenden Flüsisgkeit suspendierten Teilchen erfolgt zwischen Elektroden, an welche eine hinreichend hohe Potentialdifferenz gelegt ist. Alle drei Arten von Erscheinungen hängen ab von der Doppelschicht, welche an der Grenze Metall-Lösung existiert und es lassen sich auch hier durch geeignete Zusätze diese Potentialdifferenzen beeinflussen und Umkehrungen des Vorzeichens der genannten Erscheinungen beobachten. Die bisherigen Resultate sind jedoch noch wenig durchsichtig und eindeutig, offenbar überlagern sich mancherlei sekundäre Effekte, die einen irgendwie sicheren Schluß auf die Lage des absoluten Nullpunktes noch nicht gestatten.

9f) Radioaktive Methode von G. v. Hevesy. Eine recht interessante Methode zur Bestimmung des Potentialsprunges Metall—Elektrolyt hat G. v. Hevesy angegeben. Bereits v. Lerch hatte darauf aufmerksam gemacht, daß für die Zusammensetzung des bei der Elektrolyse ausgeschiedenen radioaktiven Niederschlages der Potentialsprung Metall—Elektrolyt maßgeblich sei. v. Hevesy untersuchte nun das Verhältnis, in dem sich zwei radioaktive Substanzen, z. B. ActB, ActC, ferner ThB und ThC oder RaB und RaC z. B. auf einem Kupfer- oder Silberblech ausscheiden, an dem durch Zusatz von Kupfer- resp. Silberionen zur Lösung ein definierter Potentialsprung hergestellt war; bei den edleren Potentialen scheidet sich z. B. reines ActC aus, bei den unedleren Potentialen dagegen wesentlich das ActB. Das Potential, bei dem sich ActB und ActC in demselben Verhältnis ausscheiden, wie sie in der Lösung vorhanden sind, entspricht nun sehr nahe dem Werte des absoluten Nullpunktes der Potentialdifferenz, wie er sich aus den elektrokapillaren Methoden ergibt. Wesentlich ist hier, daß die minimalen Mengen ausgeschiedener radioaktiver Stoffe den Potentialsprung nicht beeinflussen. Wenn auch der Mechanismus des Prozesses noch einiger Aufklärung bedarf, so sprechen doch diese Beobachtungen ebenfalls für den richtigen Wert des angenommenen Nullpunktes.

10. Elektrokapillare Bewegungserscheinungen; Kapillartelephon. Die durch Anlegen größerer Spannungen eintretende Aenderung der Oberflächenspannung des Quecksilbers kann bei geeigneter Anordnung zu mancherlei Bewegungserscheinungen Anlaß geben, die besonders Christiansen untersucht hat. Sehr hübsch läßt sich dies demonstrieren in einer etwa 5 mm weiten Glasröhre von 20 bis 30 cm Länge, die z. B. mit verdünnter Schwefelsäure gefüllt ist, und in deren seitliche Ansätze zwei Platinelektroden eintauchen, wie dies die Figur 9 veranschaulicht:

In der Röhre liegt ein sie nicht ganz ausfüllender Quecksilbertropfen. Wird nun an

Fig. 9.

die Elektroden eine Spannung von ca. 30 Volt gelegt, so bewegt sich der Quecksilbertropfen in rollender Weise mit erheblicher Geschwindigkeit dem negativen Pole zu; der vorher runde Tropfen wird dabei eiförmig, sein spitzes Ende dem positiven Pol zukehrend. Wird der Strom kommutiert, so läuft auch der Tropfen nach der entgegengesetzten Seite. Bei Steigerung der Spannung bildet sich am Tropfen ein ringförmiger Wulst, bis bei weiterer Steigerung sich ein kleiner Tropfen vom größeren trennt. Die Erscheinungen erklären sich leicht, wenn man bedenkt, daß die Oberflächenspannung des Tropfens auf der einen Seite vergrößert, auf der anderen verkleinert ist, so daß er nicht im Gleichgewicht sein kann. Aus analogen Gründen werden fallende Quecksilbertropfen in einer Lösung, durch die senkrecht zur Fallrichtung ein elektrischer Strom fließt, seitwärts abgelenkt. Als hübscher Demonstrationsversuch derartiger Bewegungserscheinungen ist aber vor allem die unter der Bezeichnung „Quecksilberherz" bekannte Erscheinung zu erwähnen. Der Versuch wird in der Weise angestellt, daß auf eine größere Uhrschale ein Quecksilbertropfen von ca. 2 bis 3 cm Durchmesser gebracht und mit verdünnter Schwefelsäure, der wenige Tropfen von Kaliumbichromatlösung zugesetzt sind, übergossen wird. Eine Eisennadel, am einfachsten eine gewöhnliche Stopfnadel, wird nun so in die Lösung gebracht, daß ihre Spitze das Quecksilber am Rande eben berührt. Der Tropfen zuckt zusammen, da er durch das gebildete Element Eisen-Quecksilber kathodisch polarisiert wird, und die Verbindung Eisen-Quecksilber wird unterbrochen. Damit ist aber die kathodische Polarisation beseitigt, zumal das Kaliumbichromat depolarisierend wirkt, der Tropfen

Digitized by Google

nimmt daher seine ursprüngliche Gestalt wieder an, so daß die Eisenspitze wieder in das Quecksilber eintaucht. Jetzt wiederholt sich das Spiel und der ganze Tropfen gerät schließlich in sternförmige Zuckungen, deren Bewegung an ein pulsierendes Herz erinnert und die wohl eine halbe Stunde lang anhalten können. Derartige periodische Bewegungserscheinungen können auch ohne Zuhilfenahme eines zweiten Metalls auftreten, wenn man nämlich einen Quecksilbertropfen unter Säurelösung einseitig mit etwas Kaliumbichromat in Berührung bringt; der Tropfen bewegt sich zuerst auf das Kaliumbichromat zu, entfernt sich dann und oszilliert so unregelmäßig hin und her. Hier wird der Tropfen auf der Seite, wo er mit dem Kaliumbichromat in Berührung kommt, oxydiert und seine Potentialdifferenz geändert, so daß sich dort seine Oberflächenspannung verringert. In der Säure wird die Oxydation wieder aufgehoben und der Bewegungssinn kehrt sich um.

Es ist bereits oben das zu diesen Erscheinungen gewissermaßen reziproke Phänomen erwähnt, daß man in einem Kapillarelektrometer einen Strom erhält, wenn man die Oberfläche des Meniskus durch Erschüttern dehnt oder verkleinert. Diese Tatsache hat zuerst Bréguet zur Konstruktion eines sogenannten Kapillartelephons benutzt, das später von verschiedenen anderen verbessert und durchkonstruiert ist. Eine von dem Physiologen Lovén herrührende Konstruktion gibt die Figur 10

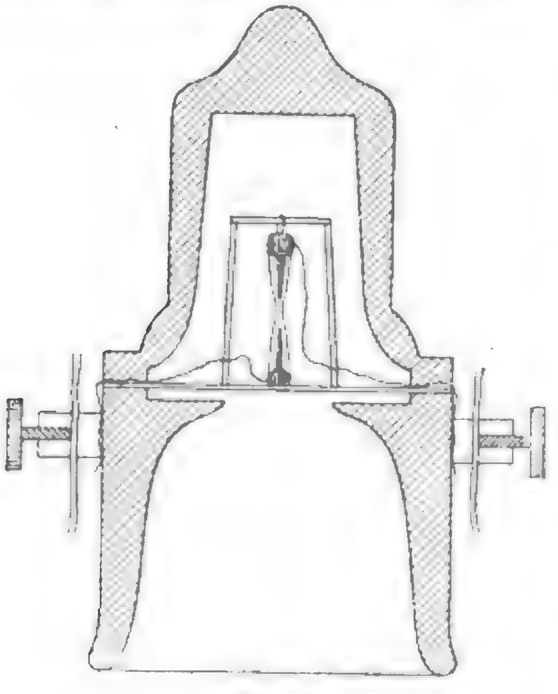


Fig. 10.

wieder. Das Wesentliche des Apparates ist ein kleines, $1^1/_2$ bis 2 cm langes, in der Mitte verengtes Glasrohr aus sehr dünnem Glase mit Quecksilberfüllung, die an der Einschnürung durch einen Tropfen verdünnter Schwefelsäure unterbrochen ist. Platindrähte an beiden mit Siegellack verkitteten Enden vermitteln den Kontakt. Im fertigen Röhrchen darf keine Spur von Luft zurückbleiben. Dieses Röhrchen ist mittels eines feinen, leichten, hölzernen „Galgens" senkrecht auf einer dünnen Holzmembran befestigt. Das Ganze befindet sich in einer hölzernen Kapsel mit Schalltrichter; außen sind Klemmschrauben angebracht, die mit den beiden Platindrähten in leitender Verbindung stehen. Zwei solche Vorrichtungen, miteinander verbunden, sollen als Geber und Hörer gut funktionieren. Die Wirkungsweise dieser Anordnung sowohl als Geber wie als Hörer ist nach dem oben Gesagten leicht verständlich. Die Wiedergabe der Sprache ist vortrefflich, eher freier von Nebengeräuschen als das elektromagnetische Telephon; an Lautstärke resp. Empfindlichkeit steht es letzterem jedoch sehr stark nach. Boruttau verbesserte den Effekt des Gebers durch Hintereinanderschaltung mehrerer Kapillarröhrchen, von denen die beiden stärkeren äußeren die Beine des Galgens ersetzen. Näheres findet man in dem unten zitierten zusammenfassenden Bericht von Boruttau.

Die Verschiebung des Quecksilbermeniskus in der Kapillare bei Einschaltung einer Potentialdifferenz hat übrigens schon Lippmann zur Konstruktion eines Motors benutzt, indem er zur Verstärkung der Wirkung ein ganzes Bündel von Kapillaren verwandte. Die Ausführung eines solchen Elektrokapillarmotors findet sich im Deutschen Museum in München.

11. Kapillarelektrische Erscheinungen an Quecksilber in nichtwässerigen Lösungsmitteln und an der Grenze zweier Lösungsmittel. Die hier geschilderten kapillarelektrischen Erscheinungen an der Grenzfläche Quecksilber-Lösung beziehen sich ausschließlich auf wässerige Lösungen. Von kapillarelektrischen Untersuchungen an Quecksilber in anderen Lösungsmitteln liegen nur sehr wenige vor, die noch keine bemerkenswerten Resultate gezeitigt haben; sofern man aus dem Maximum der Oberflächenspannung oder den Tropfelektroden auf den absoluten Nullpunkt mit Sicherheit schließen darf, würden derartige Untersuchungen die Abhängigkeit der Lösungstension vom Lösungsmittel zu messen gestatten, worüber bisher kaum irgendwie Zuverlässiges bekannt ist.

Nur einige wenige Versuche liegen bisher vor über die Aenderung der Potentialdifferenz und der Oberflächenspannung, an der Grenzfläche zweier verschiedener Lösungsmittel; Krouchkoll stellte Messungen mit einem Kapillarelektrometer an, das

Digitized by Google

aus Aethyläther, mit Urannitrat gesättigt, und einer ebenfalls mit Urannitrat gesättigten wässerigen Lösung bestand; es ließ sich bei Anwendung von etwa 28 Volt hier auch eine Elektrokapillarkurve mit einem Maximum beobachten, ebenso in einem System Schwefelkohlenstoff-angesäuertes Wasser. Neuerdings sind noch von v. Lerch ähnliche Versuche mit der Steighöhenmethode an der Grenzfläche Wasser-Benzol bei Gegenwart einer Reihe anorganischer und organischer Säuren, Alkalien und Salze angestellt worden. Nähere Aufschlüsse über die an derartigen Grenzflächen existierenden Potentialdifferenzen haben sich bisher jedoch nicht erzielen lassen.

12. Kapillarelektrische Erscheinungen an geschmolzenen Metallen unter geschmolzenen Salzen. Schließlich liegen noch einige Untersuchungen über kapillarelektrische Systeme vor, die aus einem flüssigen, resp. geschmolzenen Metall und geschmolzenen Salzen aufgebaut sind. Als Metalle sind dabei außer Quecksilber verwandt vor allem geschmolzenes Blei und Zinn, als geschmolzene Salze, respektive Gemische solcher KCl, KCl — KJ, NaJ — NaCl, NaJ, LiCl — KCl, $LiNO_3$ — KNO_3 und andere. Ein geschmolzenes Metall unter seinen geschmolzenen Halogensalzen ist dabei unpolarisierbar und gibt daher keine Elektrokapillarkurve. Sonst aber existiert kein prinzipieller Unterschied zwischen dem kapillarelektrischen Phänomen im Schmelzfluß und dem in wässerigen Elektrolyten und man erhält auch hier parabelähnliche Elektrokapillarkurven; nur muß die Konzentration des Elektrodenmetalls in der Schmelze sehr klein sein, damit eine Verarmung desselben durch kathodische Polarisation eintritt.

Literatur. **Grätz**, *Ueber die Bewegungserscheinungen an kapillaren Quecksilberelektroden. Dissertation. Breslau 1879.* — **G. Lippmann**, *Ann. chem. phys. (5),* **5**, *494, 1875.* — **W. Nernst**, *Referat über Berührungselektrizität. Beilage zu Wied. Ann.* **58**, *1896, Heft 8.* — **F. Krüger**, *Ueber die Theorien der Elektrokapillarität und der Tropfelektroden. Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik, II. Bd., Heft 1, 1904.* — **Palmaer**, *Zeitschr. für physik. Chem.* **59**, *187, 1907.* — **H. Freundlich**, *Kapillarchemie. Leipzig 1909.* — **G. v. Hevesy**, *Radioaktive Methoden in der Elektrochemie. Physik. Zeitschrift* **13**, *715, 1912.* — **Boruttau**, *Zur Geschichte, Konstruktion und Wirkungsweise des Kapillartelephons. Physikal. Zeitschrift* **7**, *229, 1906.* — **G. v. Hevesy**, *Das kapillarelektrische Phänomen im Schmelzfluß. Zeitschr. f. phys. Chem.* **74**, *443, 1910.*

F. Krüger.

Elektrolytische Leitfähigkeit.

1. Begriff und Methode der Messung der elektrolytischen Leitfähigkeit. 2. Aequivalent-Leitvermögen. 3. Mechanismus der elektrolytischen Leitfähigkeit: a) Bestimmung der Ueberführungszahlen (Hittorf). b) Unabhängige Wanderung der Ionen (Kohlrausch). c) Dissoziationsgrad (Arrhenius). 4. Die Wanderungsgeschwindigkeit in absolutem Maß.

1. Begriff und Methode der Messung der elektrolytischen Leitfähigkeit (vgl. auch die Artikel „Elektrizitätsleitung" und „Elektrischer Widerstand"). Ersetzt man in einem Stromkreise, dessen Stromquelle ein Akkumulator sein mag, ein Stück metallischen Leiters durch einen Elektrolyten selbst von sehr viel größerem Querschnitt, etwa durch verdünnte Schwefelsäure zwischen Platinelektroden, so erkennt man an einem eingeschalteten Galvanometer ein erhebliches Sinken der Stromstärke. Daß der Grund dafür nicht allein in einer Vergrößerung des Leitungswiderstandes zu suchen ist, sondern auch in dem Vorgange an den Elektroden, wird sofort kenntlich, wenn man die Platinanode, an welcher sich der Sauerstoff entwickelt, durch eine Kupferanode ersetzt. Es wird dann anodisch nicht Sauerstoff entwickelt, sondern Kupfer aufgelöst und der Strom steigt an. Gelangt sodann das entstehende Kupfersulfat an die Kathode, wodurch an die Stelle der Wasserstoffentwickelung Kupferabscheidung tritt, so entsteht ein abermaliger Stromanstieg. Um nun zur Kenntnis des Leitungswiderstandes des Elektrolyten zu gelangen, muß man sich von dem Elektrodenvorgange und der dadurch herbeigeführten Polarisation der Elektroden, welche als Gegenkraft wirkt und dadurch den Widerstand scheinbar vergrößert, frei machen. Dies kann geschehen, indem man die Flüssigkeitssäule von vornherein in den Kreis einschaltet und nur den Abstand der Elektroden ändert.

Die Anzahl Ohm, die an dem gleichzeitig eingeschalteten Rheostaten aus- oder eingeschaltet werden müssen, um die Verlängerung oder Verkürzung der Flüssigkeitssäule zu kompensieren, gibt dann den Widerstand der ein- oder ausgeschalteten Flüssigkeit. Um eine Vorstellung von den Größen zu geben, sei erwähnt, daß die bestleitenden Elektrolyte etwa 10 000 mal schlechter leiten als eine Quecksilbersäule von gleichen Dimensionen.

Man hat versucht den Einfluß der Polarisation durch öfteren Wechsel der Stromrichtung während des Versuches zu eliminieren. F. Kohlrausch hat diesen Zweck in vollkommener Weise dadurch erreicht, daß er durch die Flüssigkeit einen rasch intermittierenden und dabei die Richtung wechselnden Strom sandte. Ein solcher

Digitized by Google

Wechselstrom wird durch einen Induktionsapparat erhalten. Infolge des fortwährenden Polwechsels wird jede Polarisation durch die daraufFolgende entgegengesetzte aufgehoben. Die Messung der Stromstärke ist in diesem Falle nicht mittels eines gewöhnlichen Galvanometers möglich, wohl aber mittels des Elektrodynamometers

Für genauere Messungen verwendet man allgemein die Anordnung der Wheatstoneschen Brücke (vgl. den Artikel „Elektrizitätsleitung") in der handlichen Form, welche ihr durch F. Kohlrausch gegeben worden ist. Die Abwesenheit des Stromes im Brückenzweig wird mit Hilfe eines Telephons konstatiert. Die durch den einzelnen Stromstoß erfolgende Polarisation der Elektroden ist um so geringer, auf eine je größere Fläche die Wirkung des Stromstoßes sich verteilt. Man fördert also die beabsichtigte Wirkung des Wechselstromes, d. i. die Vermeidung der Polarisation durch Vergrößerung der Elektroden. Diese gelingt, ohne die Dimensionen der Gefäße und damit die benötigten Flüssigkeitsquantitäten unbequem anwachsen zu lassen, indem man die Platinelektroden elektrolytisch mit Platinschwarz — fein verteiltem Platin — überzieht.

Man ist übereingekommen, das Leitvermögen auf dasjenige eines Körpers zu beziehen, von welchem 1 cm-Würfel den Widerstand von 1 Ohm hat. Dieser Einheitskörper wird etwa dargestellt durch bestleitende (30 prozentige) Schwefelsäure von Blutwärme. Man würde also $\varkappa$, das Leitvermögen eines Zentimeterwürfels oder das spezifische Leitvermögen der Elektrolyte, sofort erhalten, wenn man den Widerstand w in einem Zentimeterwürfelgefäß messen würde, von dem zwei gegenüberstehende Seiten die platinierten Platinelektroden wären, dann wäre: $\varkappa = \frac{1}{w}$. Hat man ein anderes zylindrisches Gefäß, etwa ein Glasrohr, welches, eng anschließend an die Glaswand, zwei kreisförmige Elektroden von f qcm Oberfläche in dem Abstande von l cm trägt, so ist das spezifische Leitvermögen

$$\varkappa = \frac{l}{f} \cdot \frac{1}{w},$$

wobei w wieder der gemessene Widerstand in Ohm ist. Man findet so z. B. bei der Temperatur von 18° für eine Normal-KCl-Lösung, d. i. eine solche, welche ein Molekulargewicht in Grammen (74,60 g KCl) im Liter enthält:

$$\varkappa_{18^\circ} = 0{,}09822,$$

für eine Zehntelnormal-KCl-Lösung (7,460 g KCl im Liter):

$$\varkappa_{18^\circ} = 0{,}01119.$$

Ist man auf diese Weise einmal zur Kenntnis des Leitvermögens irgendeiner Lösung, z. B. n-KCl gelangt, so bedarf es zur Leitfähigkeitsbestimmung anderer Lösungen nicht mehr solcher Gefäße, deren Form die Ausmessung gestattet. Man bestimmt dann die „Widerstandskapazität" der Gefäße, d. h. denjenigen Widerstand C, welchen der Einheitskörper (von dem 1 cm-Würfel 1 Ohm Widerstand hat) darin zeigen würde. Dazu benutzt man auf den Einheitskörper bereits bezogene Eichflüssigkeiten.

Als solche eignen sich Lösungen, die unschwer mit gleichem Leitvermögen zu reproduzieren sind und leicht ungeändert aufbewahrt werden können. Außer den angeführten KCl-Lösungen verwendet man gern Elektrolyte in Konzentrationen, bei welchen ihre Leitfähigkeit ein Maximum hat, so daß die durch Verdunstung usw. entstehenden kleinen Gehaltsänderungen das Leitvermögen nicht merklich beeinflussen. Daraus, daß es auf die genaue Konzentration nicht ankommt, entsteht zugleich der Vorteil, daß diese Flüssigkeiten leicht hergestellt werden können, z. B. genügend genau nach dem mit einer Mohrschen Wage oder einem Aräometer bestimmten spezifischen Gewicht. Solche Lösungen sind:

1. Maximal-Schwefelsäure: 30 Gew.-Proz. H_2SO_4; spez. Gew. bei 18° = 1,223; $\varkappa_{18^\circ} = 0{,}7398$.

2. Maximal-Magnesiumsulfat: 17,4 Gew.-Proz. $MgSO_4$; spez. Gew. bei 18° = 1,190; $\varkappa_{18^\circ} = 0{,}04922$.

Keiner Wägung oder aräometrischen Messung bedürfen:

3. Gesättigte Chlornatriumlösung: $\varkappa_{18^\circ} = 0{,}2161$.

4. Gesättigte Gipslösung: $\varkappa_{18^\circ} = 0{,}001891$.

Zur Herstellung von schlecht leitenden Lösungen, wie der zuletzt genannten, ist reines „Leitfähigkeitswasser" erforderlich, welches erhalten wird, indem man Wasser durch mehrfache Destillation zuerst von den schwerflüchtigen Salzen, nach Zusatz von Kalkwasser von Kohlensäure und wieder nach Zusatz von etwas Schwefelsäure oder Phosphorsäure von Ammoniak reinigt. Geringe Mengen sind bequem dadurch zu erhalten, daß man Wasser ausfrieren läßt bis auf einen geringen Rest, in welchem die löslichen Bestandteile verbleiben und der fortzugießen ist. Für die Auswahl unter den genannten Eichflüssigkeiten ist maßgebend, daß der Widerstand eine bequem meßbare Größe erhält, zwischen 50 und 2000 Ohm; man nimmt für große Kapazitäten gut leitende und für kleine schlecht leitende Flüssigkeiten.

Zeigt eine der genannten Lösungen von der Leitfähigkeit $\varkappa$ im Widerstandsgefäß den Widerstand w, so würde der Einheitskörper zeigen $C = \varkappa . w$. Mißt man den Widerstand w_x irgendeiner anderen Lösung in dem Gefäß

Digitized by Google

von der bekannten Widerstandskapazität C, so ergibt sich deren spezifische Leitfähigkeit $\varkappa_x = \frac{C}{w_x}$. Figur 1 und 2 zeigen zwei von den zahlreichen Formen für Widerstandsgefäße.

2. Aequivalent-Leitvermögen. Die spezifische Leitfähigkeit wächst, wie die Zahlen für n-KCl und 0,1 n-KCl andeuten, mit dem Gehalt der Lösung. Um verschiedene Elektrolyte miteinander zu vergleichen, wählt man chemisch gleichwertige Lösungen, d. h. Lösungen, die eine gleiche Anzahl von Grammäquivalenten (nicht Molekülen) enthalten. Ein Grammäquivalent ist das Formelgewicht in Grammen, dividiert durch die Anzahl elektrochemischer Aequivalente, die zu seiner vollständigen elektrolytischen Zerlegung erforderlich wären, also:

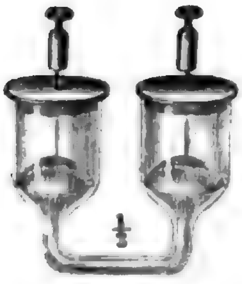


Fig. 1.

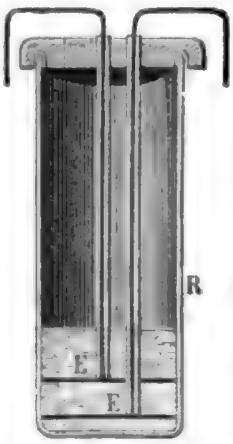


Fig. 2.

$$39{,}15 + 35{,}45 = 74{,}60 \text{ g KCl}$$

und entsprechend

HCl, ½ H_2SO_4, ½ $BaCl_2$, ½ $MgSO_4$ usw. (vgl. auch den Artikel „Aequivalent").

Man bezeichnet mit η die Aequivalentkonzentration einer Lösung, d. h. die Anzahl Grammäquivalente des gelösten Stoffes im Kubikzentimeter der Lösung. Dividiert man $\varkappa$ durch η, so erhält man das Leitvermögen eines Grammäquivalents oder das Aequivalentleitvermögen $\Lambda = \frac{\varkappa}{\eta}$.

Das spezifische Leitvermögen steigt im allgemeinen mit zunehmender Konzentration an, und zwar um so weniger, je mehr die Konzentration wächst. Bei Elektrolyten, die höhere Konzentrationen zulassen, überschreitet $\varkappa$ ein Maximum, was unmittelbar aus der früher erwähnten Tatsache verständlich wird, daß die reinen Komponenten auch gut leitender Mischungen nur schlechte Leiter sind. Zur Demonstration des Maximums schaltet man in den Stromkreis eines Induktoriums ein lautsprechendes Telephon und reines Wasser zwischen Platinplatten. Das Telephon spricht kaum an, ebensowenig, wenn man an die Stelle des Wassers reine Essigsäure bringt. Fügt man aber Wasser zur Essigsäure oder Essigsäure zum Wasser, so wächst die im Telephongeräusch kenntliche Leitfähigkeit der Lösung.

Die folgende Tabelle gibt die Werte von $\varkappa$ für einige vielbenutzte Lösungen nach Kohlrausch.

Spezifisches Leitvermögen wässeriger Lösungen bei 18°.

Prozente	KCl	$NaCl$	$CaCl_2$	$ZnCl_2$	$MgCl_2$	$AgNO_3$	$ZnSO_4$	$CuSO_4$	$CdSO_4$	HCl	H_2SO_4	$C_2H_4O_2$	$NaOH$
5	0,0690	0,0672	0,0643	0,0483	0,0683	0,0256	0,0191	0,0189	0,0146	0,3948	0,2085	0,001 23	0,1969
10	0,1359	0,1211	0,1141	0,0727	0,1128	0,0476	0,0321	0,0320	0,0247	0,6302	0,3915	0,001 53	0,3124
15	0,2020	0,1642	0,1505	—	—	0,0683	0,0415	0,0421	0,0325	0,7453	0,5432	0,001 62	0,3463
20	0,2677	0,1957	0,1728	0,0912	0,1402	0,0872	0,0468	—	0,0388	0,7615	0,6527	0,001 61	0,3270
25	—	0,2135	0,1781	—	—	0,1058	0,0480	—	0,0430	0,7225	0,7171	0,001 52	0,2717
30	—	—	0,1658	0,0926	0,1061	0,1239	0,0444	—	0,0436	0,6620	0,7388	0,001 40	0,2022
40	—	—	—	0,0845	—	0,1565	—	—	—	0,5152	0,6800	0,001 08	0,1164
50	—	—	—	0,0640	—	0,1856	—	—	—	—	0,5405	0,000 74	—

Während das spezifische Leitvermögen, als das Leitvermögen eines Kubikzentimeters Lösung, wenigstens in verdünnten Lösungen mit zunehmender Konzentration ansteigt, steigt umgekehrt das Aequivalentleitvermögen, d. h. das Leitvermögen eines Grammäquivalentes gelöster Substanz, in je mehr Lösungsmittel es gelöst ist, also mit zunehmender Verdünnung.

Tabellen über das Aequivalent-Leitvermögen finden sich in dem unten genannten Werke von Kohlrausch und Holborn, eine Auswahl der wichtigeren auch bei Coehn in Müller-Pouillets Lehrbuch der Physik.

3. Mechanismus der elektrolytischen Leitfähigkeit. Dem allmählichen Anwachsen der Aequivalentleitfähigkeit mit steigender Verdünnung vermochte man keine Inter-

Digitized by Google

pretation zu geben, welche der experimentellen Prüfung zugänglich gewesen wäre. Wohl aber gelang in der Deutung des konstanten Maximalwertes gut leitender Lösungen ein für die Theorie der Elektrolyse wesentlicher Fortschritt (F. Kohlrausch). Findet nämlich jedes Ion bei seiner Wanderung einen ihm eigentümlichen Widerstand (der auf seine Reibung an dem Lösungsmittel zurückführbar ist), so würde der Gesamtwiderstand des Elektrolyten durch die Summe dieser Widerstände seiner Ionen bestimmt sein. Betrachten wir nicht die Widerstände, sondern die Aequivalentleitfähigkeit Λ und nennen l_K und l_A die entsprechenden Leitfähigkeiten oder „Beweglichkeiten" des Kations und des Anions, so ist bei ausreichender Verdünnung: $\Lambda = K\ (l_K + l_A)$, wo K ein Proportionalitätsfaktor ist, der von der Einheit abhängt, in welcher wir die Geschwindigkeit messen. K wird 1, wenn wir die Beweglichkeiten l_K und l_A in demselben Maße messen wie Λ, d. h. in „reziproken Ohm". Die Gleichung lautet dann: $\Lambda = l_K + l_A$. Um die Einzelwerte l_K und l_A zu ermitteln, bedarf es einer zweiten Beziehung zwischen den beiden Unbekannten. Diese wird geliefert durch die Messung der Ueberführungszahlen.

3a) Bestimmung der Ueberführungszahlen. Die Beobachtungstatsache, von der wir ausgehen, ist die Konzentrationsänderung, welche man während der Elektrolyse von den Elektroden her sich in das Innere des Elektrolyten ausbreiten sieht.

Die Demonstration dieser Erscheinung geschieht am besten und ungestört von Gasentwickelung durch Projektion eines kleinen planparallelen Troges, der mit verdünnter und mit Schwefelsäure angesäuerter Kupfersulfatlösung gefüllt ist und in welchem als Elektroden zwei L-förmig gebogene Kupferdrähte eintauchen. Bei Stromschluß durch einen Akkumulator bemerkt man sofort an der Kathode Aufsteigen einer verdünnten, an der Anode Herabsinken einer konzentrierten Lösung. Wird mit Hilfe eines Kommutators die Stromrichtung umgekehrt, so sieht man nach wenigen Augenblicken auch die Konzentrationsänderungen sich vertauschen.

Diese Konzentrationsänderungen sind von Hittorf (1853) zurückgeführt worden auf die Bewegungen der entgegengesetzt geladenen Bestandteile des Elektrolyten. Daß unabhängig von den Zersetzungsvorgängen an den Elektroden solche Bewegungen im Innern des Elektrolyten stattfinden, ist aus folgendem Versuche zu ersehen. In ein U-Rohr mit Hähnen (Fig. 3) bringt man eine verdünnte Lösung des tiefblauen ammoniakalischen Kupfersulfats, welches mit einigen Tropfen des in Ammoniak tiefroten Phenolphtaleins versetzt ist. Die Hähne werden sodann geschlossen, die geraden Schenkel ausgespült und mit verdünnter Ammoniaklösung gleich hoch gefüllt. Bei geöffneten Hähnen wird dann mit zwei Platindrähten

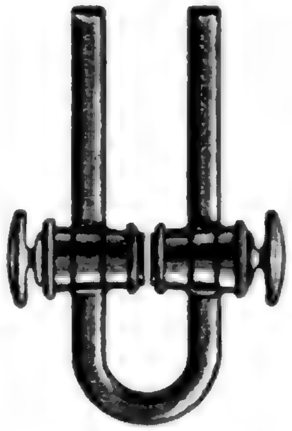


Fig. 3.

als Elektroden Strom hindurchgeleitet: man sieht dann aus der violetten Lösung in die farblose Lösung an der Kathodenseite die tiefblaue, an der Anodenseite die tiefrote herauswandern.

Die in einem einheitlichen Elektrolyten wie Kupfersulfat an den Elektroden sich beim Stromdurchgange herstellenden Konzentrationsdifferenzen sind also zurückzuführen auf die kombinierte Wirkung des nach dem Faradayschen Gesetz (vgl. den Artikel „Elektrochemie") stattfindenden Elektrodenvorganges und die gegeneinander erfolgende Wanderung von Kation und Anion innerhalb des Elektrolyten. Da der erste Effekt aus der Kenntnis der durch den Elektrolyten gegangenen Strommenge sich ergibt, so ist aus den eingetretenen Konzentrationsänderungen an Anode und Kathode ein Urteil zu gewinnen über das Verhältnis der Wanderungsgeschwindigkeiten, mit welchem Anion und Kation sich gegeneinander bewegen. Eine anschauliche Vorstellung davon ergibt das folgende Schema (entnommen aus Coehn, Elektrochemie, in Müller-Pouillets Lehrbuch der Physik IV).

Aus steifem Koordinatenpapier sind drei Streifen geschnitten, wie sie die Figur 4 zeigt. Der breitere erhält die quer eingeschnittenen zur Hervorhebung geschwärzten Bänder, unter welchen die zwei schmaleren Streifen verschiebbar sind. Auf diesen sind von 5 zu 5 mm +- und —-Zeichen (Kationen und Anionen) angebracht, welche zur Erleichterung der Ablesungen nach beiden Seiten hin nummeriert sind, und die in der Ruhelage, d. h. vor und nach jedem Versuch, sich immer untereinander befinden sollen. Der Weg von einer Ruhelage zur anderen beträgt also hier für jedes entgegengesetzt wandernde Anion- und Kationpaar in Summe 5 mm oder ein

Vielfaches davon. Sobald aber die Summe der entgegengesetzt gerichteten Bewegungen 5 mm beträgt, ist immer, wie der Versuch am Schema zeigt, ein Kation und ein Anion an den Enden frei geworden, d. h. an der Kathode oder Anode abgeschieden.

Wir lassen nun so viel Strom hindurchgehen, daß in Summa 10 Wegeinheiten, d. i. 10×5 mm zurückgelegt sind und zwar sollen diese auf Kation und Anion sich gleichmäßig verteilen, so daß also der Kationstreifen um 5×5 mm nach links, der Anionstreifen um ebensoviel nach rechts zu verschieben ist. Dann sind zehn Kationen und zehn Anionen an den Elektroden entladen und fallen aus dem Schema der **Paare**, welches allein den Zustand in der Lösung versinnbildlicht, heraus.

Vor der Elektrolyse waren in der Mittelschicht drei und an jeder Seite zwölf Paare. Sind zehn Kationen an der Kathode ausgeschieden, so würden an der Kathodenseite nur noch $12 - 10 = 2$ Kationen vorhanden sein können. Nun sind durch Wanderung $\frac{1}{2} . 10 = 5$ hinzugekommen. Es müssen also vorhanden sein $2 + 5 = 7$ Kationen. Anionen sind von derselben Seite auch 5 fortgewandert, so daß $12 - 5 = 7$ geblieben sind, somit ebensoviele wie Kationen, also 5 Moleküle. Die entsprechende Betrachtung gilt, da Kation und Anion gleich schnell wandern sollen, für die Anodenseite. Die Figur 4b gibt die Verhältnisse wieder und zeigt zugleich, daß die Mittelschicht unverändert geblieben sein muß, da 5 Ionen von jeder Gattung hinein- und herausgewandert sind.

Jetzt nehmen wir den Fall, daß die Wegeinheit vom Kation und Anion in ungleichen Teilstrecken, etwa im Verhältnis $^3/_5 : ^2/_5$ zurückgelegt werden und betrachten wieder den Endzustand, nachdem in Summa 10 Wegeinheiten, d. i. 10×5 mm zurückgelegt sind. Die 10 Wegeinheiten verteilen sich also so, daß $\frac{3}{5} . 10 = 6$ davon vom Kation zurückgelegt werden (der obere Streifen des Modells ist um 6×5 mm nach links zu verschieben) und $\frac{2}{5} . 10 = 4$ vom Anion (der untere Streifen ist um 4×5 mm nach rechts zu bewegen). Wieder sind also 10 Kationen und 10 Anionen an den Elektroden abgeschieden. Der mittlere Teil der Lösung ist wieder unverändert geblieben, denn durch jede seiner Grenzen sind von beiden Ionengattungen ebensoviele eingetreten wie ausgetreten. Die äußeren Lösungen aber haben jetzt **verschiedene Konzentrationsänderungen** erfahren. Beide enthielten vorher je 12 Moleküle. Nun sind an der **Kathodenseite** (links) 10 Kationen entladen. Es wären also noch $12 - 10 = 2$ vorhanden. Hinzugewandert sind aber $\frac{3}{5} . 10 = 6$, also sind jetzt vorhanden $2 + 6 = 8$. Gleichzeitig sind aber (da ja nach unserer Annahme die Kationen nur einen Teil, nämlich $^3/_5$ der Gesamtwanderung ausführten) auch Anionen von der Kathodenseite fortgewandert und zwar $\frac{2}{5} . 10 = 4$. Es sind also am Ende links nur noch vorhanden $12 - 4 = 8$ Anionen. Ebenso viele Kationen aber hatten wir dort festgestellt, d. h. es sind von den ursprünglichen 12 Mol. noch 8 vorhanden, wie auch die Figur 3c zeigt.

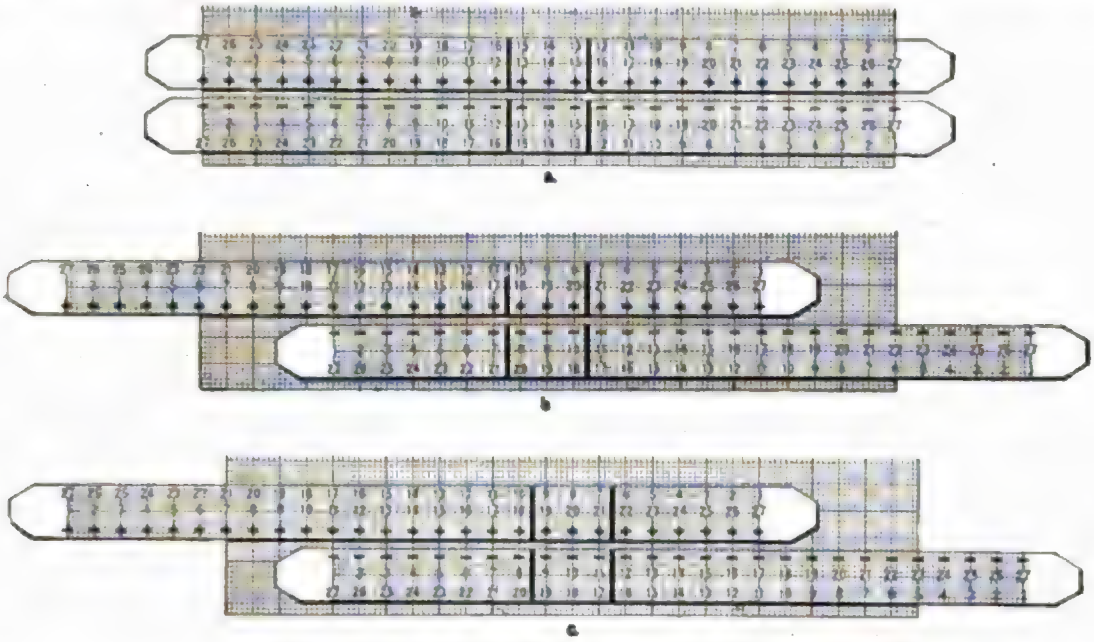


Fig. 4.

An der **Anodenseite** (rechts) sind 10

Anionen entladen. Es wären ohne Zuwanderung nur noch 12—10=2 vorhanden. Es sind aber $\frac{2}{5}$.10=4 hinzugewandert, also 2+4=6 Anionen vorhanden. Gleichzeitig sind Kationen von der Anodenseite fortgewandert und zwar $\frac{3}{5}$.10=6; es sind also noch vorhanden 12—6=6 Kationen. Statt der ursprünglichen 12 Mol. sind also an der Anodenseite noch 6 Mol. vorhanden.

Das Gesamtresultat stellt sich also so dar:

	Kathodenseite		Anodenseite	
Vorher vorhanden	12 Kationen u.	12 Anionen	12 Kationen u.	12 Anionen
Abgeschieden	—10 Kationen			—10 Anionen
Hinzugewandert	+ 6 Kationen			+ 4 Anionen
Fortgewandert		—4 Anionen	—6 Kationen	
Nachher vorhanden	8 Kationen	8 Anionen	6 Kationen	6 Anionen
Konzentrationsänderung (Verlust)	12 — 8 = 4 Mol.		12 — 6 = 6 Mol.	

Das Schema erlaubt, alle gefundenen Verhältnisse darzustellen. Man nimmt dabei praktisch die abgeschiedene Menge so groß, daß keine Bruchteile von Ionen auftreten. Bei der Salzsäure (Wanderungsgeschwindigkeit des Wasserstoffs zu der des Chlors wie 5:1) läßt man also 6 Mol. zersetzt werden (oberer Streifen 5×5 mm nach links, unterer Streifen 1×5 mm nach rechts) und hat dann:

	Kathodenseite		Anodenseite	
Vorher vorhanden	12 Wasserstoff u.	12 Chlor	12 Wasserstoff u.	12 Chlor
Abgeschieden	— 6 Wasserstoff			— 6 Chlor
Hinzugewandert	+ 5 Wasserstoff			+ 1 Chlor
Fortgewandert		— 1 Chlor	— 5 Wasserstoff	
Nachher vorhanden	11 Wasserstoff	11 Chlor	7 Wasserstoff	7 Chlor
Konzentrationsänderung (Verlust)	12 — 11 = 1 Mol.		12 — 7 = 5 Mol.	

Indem wir mit **Hittorf** gleiche oder verschiedene Wanderungsgeschwindigkeit von Kation und Anion annahmen, gelangten wird zu der Erkenntnis, daß in jedem Falle eine Konzentrationsänderung an den Elektroden auftreten muß, daß aus der Gleichheit dieser Konzentrationsänderung an Kathode und Anode auf gleiche Wanderungsgeschwindigkeit zu schließen ist und daß aus der Verschiedenheit der Konzentrationsänderung das Verhältnis der Wanderungsgeschwindigkeiten sich erkennen läßt nach der aus dem vorigen unmittelbar hervortretenden Beziehung:

$$\frac{\text{Verlust an der Kathodenseite}}{\text{Verlust an der Anodenseite}} = \frac{\text{Wanderungsgeschwindigkeit des Anions}}{\text{Wanderungsgeschwindigkeit des Kations}}.$$

Die Zielseite des s c h n e l l e r wandernden Ions zeigt also die g e r i n g e r e Konzentrationsänderung, da ja hier die an der Elektrode ausgeschiedenen Ionen durch Zuwanderung schneller ergänzt werden.

Der Elektrizitätstransport durch einen Elektrolyten teilt sich also zwischen den beiden Ionen nach Maßgabe ihrer Wanderungsgeschwindigkeit. Schicken wir durch einen Elektrolyten 1 F (= 96 540 Coul.), d. i. diejenige Elektrizitätsmenge, welche 1 Gramm-Aequivalent — z. B. 1 + 35,5 = 36,5 g HCl — zersetzt und ist n der Bruchteil von 1 F, den dabei das Anion durch die Lösung transportiert, so entfällt der zu transportierende Rest, d. i. 1—n, auf das Kation. Dieses Verhältnis, welches nach dem vorher Ausgeführten identisch sein muß mit dem Verhältnis der Wanderungsgeschwindigkeiten (das wir $l_A:l_K$ nennen wollen) ist experimentell bestimmbar aus dem Verhältnis der Konzentrationsänderungen:

$$\frac{n}{1-n} = \frac{l_A}{l_K} = \frac{\text{Verlust an der Kathodenseite}}{\text{Verlust an der Anodenseite.}}$$

Hittorf nennt n und 1—n die Ueberführungszahlen des Anions und des Kations. Die Werte n und 1—n stellen so die relativen Wanderungsgeschwindigkeiten dar, d. h. die Wanderungsgeschwindigkeiten jedes Ions im Verhältnis zur Summe der Wanderungsgeschwindigkeiten beider Ionen.

Das Prinzip der **Hittorf**schen Apparate zur Bestimmung der Ueberführungszahlen gibt das oben besprochene Schema wieder: die Lösung muß in drei Teile zerlegbar sein, deren mittlerer nach dem Versuch als unverändert zu erweisen ist. Man erkennt, daß der in Figur 3 abgebildete einfache Apparat diesem Prinzip entspricht und daß man z. B.

Digitized by Google

durch Elektrolyse von Salzsäure das Verhältnis der Wanderungsgeschwindigkeiten $l_K : l_A$, von Wasserstoff zu Chlor bestimmen kann.

3b) Unabhängige Wanderung der Ionen. Durch die Bestimmung der Ueberführungszahlen erhält man die gesuchte zweite Beziehung, welche erforderlich war, um die Einzelwerte von l_K und l_A zu bestimmen. Man hat

(1) $$\frac{l_A}{l_K} = \frac{1-n}{n} \quad \text{(Hittorf)}$$

oder: $$n = \frac{l_A}{l_K + l_A}\,;\; 1-n = \frac{l_K}{l_K + l_A}$$

(2) $$l_K + l_A = \Lambda \quad \text{(Kohlrausch)}$$

woraus:

(3) $$l_A = n\Lambda \quad ; \quad l_K = (1-n)\Lambda$$ (Kohlrausch).

So fand sich z. B. für KCl der Wert von Λ für unendlich verdünnte Lösungen (in welchen also ein Grammäquivalent KCl in einer so großen Wassermenge gelöst ist, daß durch weitere Verdünnung die Aequivalentleitfähigkeit nicht mehr geändert wird) $\Lambda\infty = 129{,}9$. Hittorfs Ueberführungsversuche hatten ergeben:

$$n = 0{,}503 \text{ und } 1-n = 0{,}497.$$

Woraus:

$$l_K = 0{,}497 . 130{,}10 = 64{,}7$$
$$\text{und } l_A = 0{,}503 . 138{,}10 = 65{,}3.$$

Die Gleichung (2) spricht das Gesetz von der unabhängigen Wanderung der Ionen aus. Denn sind einmal auf dem angegebenen Wege die Einzelwerte l_K und l_A für verschiedene Ionen festgestellt, so muß aus diesen durch Addition irgend zweier Werte l_K und l_A sich die Aequivalentleitfähigkeit einer Lösung vorhersagen lassen, welche den aus den betreffenden Ionen bestehenden Elektrolyten in weitgehender Verdünnung enthält. Man stellt das additive Verhalten einer Eigenschaft in einem Schema von der Art des folgenden dar, welches zeigt, daß die Differenzen der verschiedenen Horizontalreihen gleich sind und ebenso der Vertikalreihen:

	Tl	K	Na	Li	Differenz
JO_3	—	98,49	77,42	67,36	
					31,52 bis 31,61
Cl	131,47	130,10	108,99	98,88	
					3,60 bis 3,72
NO_3	127,75	126,50	105,33	95,18	
					15,15 bis 15,2
F	112,5	111,35	90,15	—	
Differenz	1,2 bis 1,37	21,07 bis 21,21	10,06 bis 10,15		

Man sieht aus der Tabelle, mit welcher Genauigkeit die experimentell gefundenen Werte sich der Forderung der Additivität fügen: die $\Lambda\infty$ der vier aufgeführten Kaliumverbindungen KJO_3, KCl, KNO_3, KF stehen in gleichem Abstande von den entsprechenden Natriumverbindungen und die $\Lambda\infty$ der vier Chloride TlCl, KCl, NaCl, LiCl ebenso von den entsprechenden Nitraten.

Aus Ueberführungszahl und Leitfähigkeit hat Kohlrausch in der angegebenen Weise die folgenden Werte berechnet.

Ionenbeweglichkeit im Wasser bei 18°.

Kationen				Anionen			
Cs	68	½Ba	55,5	J	66,4	JO_4	48
Rb	68	½Sr	51,7	Br	67,6	ClO	64
K	64,7	½Ca	51,8	Cl	65,4	OH	174
Na	43,6	½Mg	46,0	SCN	56,6	CHO_2	47
Li	33,4	½Zn	46,7	F	46,6	$C_2H_3O_2$	35
NH_4	64	½Cd	47,5	NO_3	61,8	$C_3H_5O_2$	31
Ag	54,0	½Cu	47,3	JO_3	33,9	½JO_4	68,4
Tl	66,0	½Pb	61,3	BrO_3	46	½CrO_4	72
H	318			ClO_3	55,0	½C_2O_4	63

Die Tabelle der von Kohlrausch gefundenen Werte für l_K und l_A setzt uns in den Stand, für alle Neutralsalze und für die gut leitenden (starken) Säuren und Basen die Aequivalentleitfähigkeit $\Lambda\infty$ durch Addition der betreffenden l_K und l_A unmittelbar anzugeben.

Die Bestimmung des Dissoziationsgrades

Digitized by Google

auf Grund der Leitfähigkeit ist im Artikel „Dissoziation“ (elektrolytische Dissoziation) behandelt.

4. Die absoluten Wanderungsgeschwindigkeiten. Die bisher gebrauchten Werte für die Wanderungsgeschwindigkeiten l_K und l_A entbehren der Anschaulichkeit. Sie sind ausgedrückt in „Leitfähigkeitseinheiten“, d. h. — da die Einheit der Leitfähigkeit ein Körper war, von dem 1 ccm-Würfel den Widerstand 1 Ohm hatte — in „reziproken Ohm“.

Um ein anschauliches Bild dieser Geschwindigkeiten zu erhalten, drücken wir sie in dem üblichen Geschwindigkeitsmaß aus und fragen, wieviel Zentimeter in der Sekunde Kation und Anion unter dem Antrieb einer bestimmten Kraft, als die wir die Potentialdifferenz von 1 Volt pro Zentimeter festsetzen wollen, zurücklegen.

Eine normale, d. h. ein Grammäquivalent im Liter haltende Salzsäurelösung von 18° bilde eine Flüssigkeitssäule von 1 qcm Querschnitt, wie die Figur 5 andeutet. Durch zwei

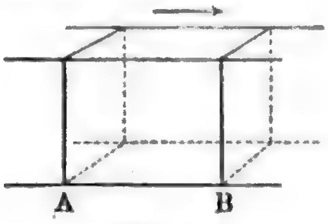


Fig. 5.

Flächen A und B im Abstande von 1 cm denken wir uns einen Kubikzentimeterwürfel herausgeschnitten. Da im Liter 1 g-Aequivalent HCl sich befindet, sind im Kubikzentimeter 0,001 g-Aequivalent vorhanden. Wir nehmen an, daß bei dieser Verdünnung der Wert Λ_∞, als die Leitfähigkeit eines Grammäquivalents, bereits erreicht ist. Die Leitfähigkeit des Kubikzentimeterwürfels wäre also:

$$0{,}001\,\Lambda_\infty = 0{,}001\,(l_H + l_{Cl}) = 0{,}001\,(318 + 65{,}44) = 0{,}318 + 0{,}0654 = 0{,}3834.$$

d. h. der Widerstand des Kubikzentimeterwürfels wäre $\frac{1}{0{,}3834}$ Ohm.

Würde also an den Ebenen A und B gerade die Potentialdifferenz von 1 Volt liegen, so wäre der Strom nach dem Ohmschen Gesetz:

$$J = \frac{1}{1/0{,}3834} = 0{,}3834 \text{ Amp.}$$

und der davon auf den Wasserstoff entfallende Anteil 0,318 Amp.

An einem Grammäquivalent Wasserstoff haftet, wie wir gesehen haben, die Elektrizitätsmenge von 96 540 Amp.-Sek. (Coulomb); an der hier im Kubikzentimeter befindlichen Menge also 0,001 . 96 540 = 96,54 Amp.-Sek. Würde diese Elektrizitätsmenge vom Wasserstoff in einer Sekunde transportiert werden, so würde das eine Stromstärke bewirken von 96,54 Amp.

Nun haben wir aber festgestellt, daß bei einer Potentialdifferenz von 1 Volt an den Enden des Kubikzentimeterwürfels der Wasserstoff nicht diese, sondern eine weit kleinere Stromstärke bewirkt, nämlich 0,318 Amp. Er braucht also, um 96,54 Amp.-Sek. hindurch zu transportieren, nicht eine Sekunde, sondern eine entsprechend längere Zeit, nämlich:

$$\frac{0{,}318}{1} = \frac{96{,}54}{x};\quad x = \frac{96{,}54}{0{,}318} = 303{,}58 \text{ Sek.}$$

In dieser Zeit werden alle Wasserstoffionen, die anfangs in der Ebene A waren, in die Ebene B gelangt sein, d. h. sie brauchen unter dem Antrieb von 1 Volt pro Zentimeter 303,58 Sekunden, um sich um 1 cm zu verschieben. Ihr Weg in der Sekunde oder ihre Geschwindigkeit ist also:

$$U = \frac{1}{303{,}58} = 0{,}003\,294 \text{ cm/sec.}$$

Allgemein ist also die Wanderungsgeschwindigkeit in Zentimetern pro Sekunde in einem Felde von 1 Volt/cm gleich der Wanderungsgeschwindigkeit in reziproken Ohm, dividiert durch 96540; für Wasserstoff

$$U = \frac{l_H}{96\,540} = \frac{318}{96\,540} = 0{,}003\,294 \text{ cm/sec.}$$

Für Chlor also:

$$V = \frac{l_{Cl}}{96\,540} = \frac{65{,}44}{96\,540} = 0{,}000\,677.$$

Es mögen die Werte für einige Kationen (U) und Anionen (V) folgen:

	cm/sec		cm/sec
U_K	= 0,000 669	V_{Cl}	= 0,000 077
U_{Na}	= 0,000 450	V_{NO_3}	= 0,000 640
U_{Li}	= 0,000 346	V_{OH}	= 0,001 802
U_H	= 0,003 294		

Die absolute Wanderungsgeschwindigkeit läßt sich leicht in einem einfachen Versuch messen und demonstrieren. Man kann sich dazu des in Figur 2 abgebildeten Apparates bedienen. In die Biegung des U-Rohres bringt man eine 0,003 n-Lösung von Kaliumpermanganat, in die geraden Schenkel darüber eine 0,003 n-Lösung von Kaliumnitrat

Digitized by Google

und in diese Platindrähte als Elektroden. Da die Leitfähigkeit der beiden Lösungen gleich ist, so findet auf der Strecke zwsichen den beiden Elektroden pro Zentimeter der gleiche Potentialabfall statt. Hat man die Spannung von 70 Volt angelegt, so verteilen sich, da etwa 2 Volt auf die Polarisation an den Elektroden zu nehmen sind, 68 Volt auf die gesamte Strecke, die 16 cm betragen möge; pro Zentimeter also herrscht ein Potentialgefälle von $\frac{68}{16} = 4{,}2$ Volt. Im Strom sieht man das gefärbte MnO_4-Ion zur positiven Elektrode wandern: es sinkt die gefärbte Grenze an der Kathoden- und steigt an der Anodenseite. In 5 Minuten (= 300 Sekunden) mögen sich die Grenzen um 1,6 cm gegeneinander verschoben haben; jede Grenzfläche wäre also bei dem Potentialgefälle von 4,2 Volt pro Zentimeter um 0,8 cm gewandert. Bei einem Potentialgefälle von 1 Volt pro Zentimeter wäre also das MnO_4-Ion bei Zimmertemperatur gewandert in einer Sekunde um

$$\frac{0{,}8}{300 . 4{,}2} = 0{,}00063 \text{ cm}.$$

Abegg und Steele haben gezeigt, daß die Methode nicht auf gefärbte Ionen zu beschränken ist. Auch bei ungefärbten Ionen kann die sich verschiebende Grenze durch die verschiedene Lichtbrechung scharf erkennbar gemacht werden.

Literatur. ***W. Hittorf,*** *Ueber die Wanderungen der Ionen. 1853 bis 1859. Ostwalds Klassiker der exakten Wissenschaften. Nr. 21 u. Nr. 23.* — ***F. Kohlrausch und L. Holborn,*** *Das Leitvermögen der Elektrolyte. Leipzig 1898.* — ***W. Ostwald,*** *Lehrbuch der allgemeinen Chemie. Bd. II, 2. Aufl. Leipzig 1893.* — ***W. Nernst,*** *Theoretische Chemie. 6. Aufl. Stuttgart 1909.* — ***M. Le Blanc,*** *Lehrbuch der Elektrochemie. 4. Aufl. Leipzig 1906.* — ***A. Coehn,*** *Elektrochemie. In Müller-Pouillets Lehrbuch der Physik IV. 10. Aufl. Braunschweig 1909.*

A. Coehn.

Elektromotorische Kräfte.

1. Der Begriff elektromotorische Kraft (EMK). 2. Die Energieträger der heutigen Physik: a) Weltäther: α) Elektrische und magnetische Form der Aetherenergie. β) Die Erregung der Aetherenergie. γ) Strahlende Aetherenergie. b) Elektrizität: α) Potentielle Energie der Elektrizität. β) Kinetische Energie der Elektrizität. γ) Die magnetischen Aeußerungen bewegter Elektronen. δ) Ausstrahlung elektromagnetischer Wellen. c) Materie: α) Potentielle Energie der Materie. β) Kinetische Energie der Materie. γ) Beziehungen zwischen Materie und Elektrizität. 3. Die Energieformen. 4. Der Mechanismus der Elektromotorischen Kräfte: a) EMKK auf Rechnung von Wärmeenergie: α) Spannungsabfall in stromdurchflossenen Leitern. β) Thomsoneffekt. γ) Peltiereffekt. δ) Thermoelemente. b) EMKK auf Rechnung von chemischer Energie. c) EMKK auf Rechnung von mechanischer Energie. d) EMKK auf Rechnung von strahlender Aetherenergie. 5. Gleich- und Wechsel-EMKK. 6. Reversible und irreversible EMKK.

1. Der Begriff elektromotorische Kraft. Alle Vorgänge in der Natur sind, vom Standpunkte der heutigen Physik gesehen, Wandlungen der Form oder des Ortes von Energie oder Arbeitsfähigkeit. Die Erfahrung lehrt uns, Energie stets an einem „Energieträger" haftend zu denken, der, um Energie aufzunehmen oder abzugeben, einem Zwange oder, wie der wissenschaftliche Ausdruck lautet, einer „Kraft" unterworfen werden muß. Kraft erscheint daher als Vermittlerin jedes Naturvorganges, und jeder Naturvorgang als Wirkung oder Aeußerung einer Kraft.

Die elektrischen Vorgänge nun sind solche Form- oder Ortsveränderungen von Energie, die durch Vermittlung des elektrischen Energieträgers, der Elektrizität, zustande kommen. Der Zwang, der imstande ist, auf ihn Arbeitsfähigkeit (elektrische Energie) zu übertragen oder sie ihm zu entziehen, heißt elektrische Kraft. Die Anordnungen, in denen solche elektrischen Kräfte tätig sind, heißen elektrische Maschinen. Die Tätigkeit, die sie ausüben, besteht darin, der Elektrizität, die durch sie hindurchgeführt wird, einen Gewinn oder Verlust von Energie zu erteilen, oder, wie man kurz sagt, eine elektromotorische Kraft (EMK) auf sie auszuüben. Da erfahrungsgemäß die Energieänderung, die eine elektrische Maschine der Elektrizität erteilt, der beteiligten Elektrizitätsmenge proportional ist, so wählt man die von der Maschine an der Einheit der Elektrizitätsmenge hervorgebrachte Energieänderung als Maß der EMK. Wirkt sie so, daß ein Gewinn an elektrischer Arbeitsfähigkeit resultiert, so nennt man den Apparat speziell einen „Generator" elektrischer Energie, und spricht von seiner EMK schlechthin; wirkt sie so, daß eine Einbuße an elektrischer Energie resultiert, einen „Verbraucher" und spricht von seiner „Gegen-EMK". Nimmt man als Einheit der Elektrizitätsmenge das Coulomb und als Einheit der Arbeit das Joule = 10^7 Erg (vgl. den Artikel „Elektrische Leistung"), so erhält man als Einheit der elektromotorischen Kraft diejenige, die einem Coulomb eine Energieänderung von einem Joule erteilt. Diese Einheit heißt 1 Volt. Ein Generator von E Volt EMK erteilt also Q Cou-

Digitized by Google

lomb, die ihn passieren, einen Arbeitszuwachs von EQ Joule. Passieren J Coulomb/sec den Generator, d. h. fließt ein elektrischer Strom von J Ampere durch ihn, so werden in dem Generator EJ Joule/sec = J E Watt entwickelt, oder die „Leistung" des Generators ist EJ Watt $= \frac{EJ}{736}$ PS. Ein Verbraucher von — E Volt Gegen-EMK entzieht entsprechend einem Strome von J Amp., der ihn durchfließt, EJ Watt, seine Leistung ist — EJ Watt. Wir können zusammenfassen: Das Produkt aus EMK und Stromstärke mißt der Größe und dem Vorzeichen nach die in einer elektrischen Maschine umgesetzte elektrische Energie.

Es folgt aus dem Energieprinzip, daß ein Generator elektrischer Energie stets ein Verbraucher irgendeiner anderen Energieform sein muß, und ein Verbraucher elektrischer Energie stets ein Generator irgendeiner anderen Energieform. Oder: EMKK und Gegen-EMKK können in den elektrischen Maschinen stets nur entstehen durch Wechselwirkungen zwischen dem elektrischen Energieträger und den anderen Energieträgern, die es gibt. So verlangt die Frage nach der Natur der elektromotorischen Kräfte zuvor die Beantwortung der Frage: Welche Energieträger gibt es außer dem elektrischen, und wie können sie mit dem elektrischen Energieträger in Wechselwirkung treten?

2. Die Energieträger der heutigen Physik. Die alte Physik brauchte, um die Naturvorgänge beschreiben zu können, eine ganze Anzahl von Energieträgern, d. h. um es zu wiederholen, von Stoffen, die man mit Arbeitsfähigkeit beladen, und mit deren Hilfe man Form- und Ortsveränderungen der Energie vor sich gehend denken kann. Die moderne Physik hat die Zahl der Energieträger auf 3 beschränkt, Weltäther, Elektrizität, greifbare Materie.

2a) Weltäther. „Weltäther" ist der physikalische Ausdruck für den sogenannten „leeren Raum". Man hebt durch diese Bezeichnung die erfahrungsmäßig auch an dem von Materie freien Raume vorhandene Fähigkeit heraus, Energieträger sein zu können (vgl. übrigens den Artikel „Weltäther").

α) Elektrische und magnetische Form der Aetherenergie. — Der Weltäther kann Energie in zwei Formen aufnehmen: als elektrostatische und als magnetische Feldenergie, indem er in den elektrischen oder magnetischen Zwangszustand versetzt wird (vgl. die Artikel „Elektrisches Feld" und „Magnetfeld"). Zwischen beiden bestehen folgende eigenartige von Maxwell erkannte Beziehungen:

I. Aendert sich die Stärke des elektrischen Zwanges, so besteht alsbald ein um die Richtung der Aenderung wirbelförmig angeordneter magnetischer Zwang, dessen Stärke der Aenderungsgeschwindigkeit proportional ist. Aus dieser Beziehung folgt der für manche Anwendungen geeignetere Satz: Aendert sich der „elektrische Fluß" (Feldstärke × Flächeninhalt) durch eine Fläche, so ist längs des Randes der Fläche eine magnetomotorische Kraft (Liniensumme der magnetischen Kraft) wirksam, die der Aenderungsgeschwindigkeit des Flusses proportional ist. Die Figur 1 veranschaulicht das und legt die Richtung des magnetischen Zwanges $\mathfrak{H}$ fest für den Fall, daß ein von vorn nach hinten gerichteter elektrischer Zwang $\mathfrak{E}$ in seiner Stärke vergrößert wird.[1]) Abnahme eines so gerichteten Zwanges ist gleichbedeutend mit Zunahme eines Zwanges entgegengesetzter Richtung.

II. Aendert sich die Stärke des magnetischen Zwanges, so besteht alsbald ein um die Richtung der Aenderung wirbelförmig angeordneter elektrischer Zwang, dessen Stärke der Aenderungsgeschwindigkeit proportional ist.

Daraus folgt wie oben: Aendert sich der „magnetische Fluß" durch eine Fläche, so ist längs des Randes der Fläche eine elektromotorische Kraft wirksam, die der Aenderungsgeschwindigkeit des Flusses proportional ist. Die zu Figur 1 analoge Figur 2 veranschaulicht wieder diese Beziehung und legt die Richtungen fest.

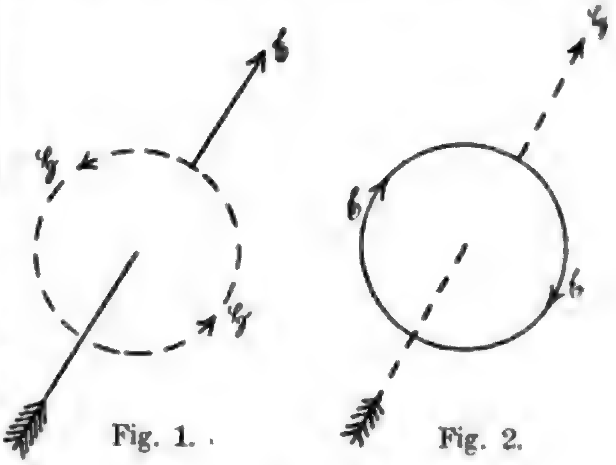


Fig. 1. Fig. 2.

β) Die „Erregung der Aetherenergie". Wird irgendwo im Aether

[1]) Im Gegensatz zu der üblichen historischen Festsetzung wird in diesem Artikel die Richtung des elektrischen Zwanges durch die Richtung festgelegt, in der ein Elektron getrieben wird. Ebenso die Richtung eines elektrischen Stromes durch die Richtung in der sich die Elektronen bewegen.

Digitized by Google

(Fig. 3 bei O) ein elektrischer Zwang $\mathfrak{E}_1$ erregt, so entsteht nach I (Fig. 1) unmittelbar darauf der Wirbel $\mathfrak{H}_1$ $\mathfrak{H}_1$ magnetischen Zwanges. Das Entstehen dieses magnetischen Zwanges muß nach II (Fig. 2) das Entstehen von Wirbeln $\mathfrak{E}_2$ $\mathfrak{E}_2$ elektrischen Zwanges zur Folge haben, die mit dem Ringe $\mathfrak{H}_1$ $\mathfrak{H}_1$ verkettet sind und insgesamt einen Wirbelring mit der Achse $\mathfrak{H}_1$ $\mathfrak{H}_1$ bilden.

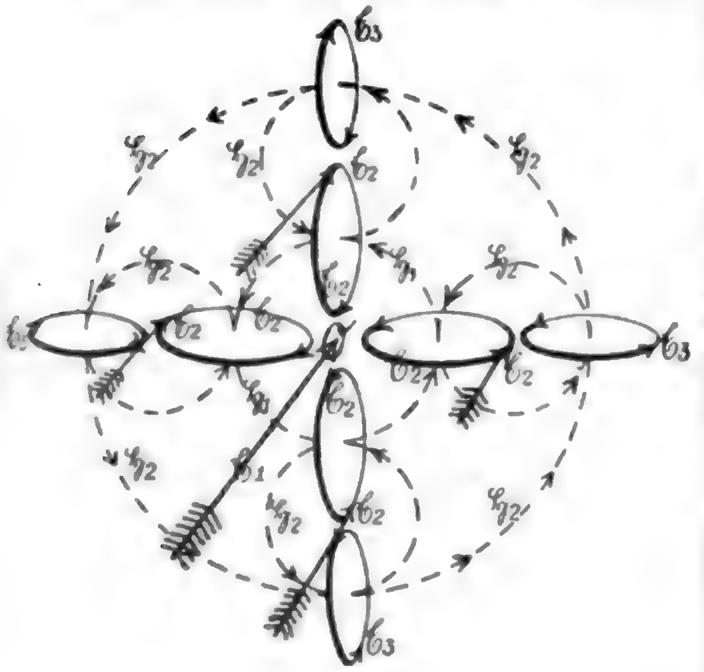


Fig. 3.

Das Entstehen der elektrischen Wirbel $\mathfrak{E}_2$ ist nun wieder von Wirbeln $\mathfrak{H}_2$ magnetischen Zwanges begleitet, diese erzeugen die Wirbel $\mathfrak{E}_3$, diese wieder $\mathfrak{H}_4$ usw., bis das ganze Feld ergriffen ist, und sich eine Gleichgewichtsverteilung des elektrischen Zwanges hergestellt hat. Figur 3 läßt nun deutlich Folgendes erkennen: jeder entstehende neue Wirbel $\mathfrak{E}$ übt, durch Vermittelung der Wirbel $\mathfrak{H}$, dort, wo er sich mit dem vorhergehenden berührt, eine Gegenkraft auf diesen aus; die Verstärkung der Wirbel $\mathfrak{E}_3$ z. B. bedeutet einen Widerstand gegen die Verstärkung von $\mathfrak{E}_2$, Verstärkung der Wirbel $\mathfrak{E}_2$ einen Widerstand gegen das Entstehen des Zwanges $\mathfrak{E}_1$ bei O. Durch die Wirbel $\mathfrak{E}_2$ summieren sich bei O die Gegenkräfte der ganzen Wirbelkette zu einer resultierenden Gegenkraft, der **Reaktion des Aethers gegen die ihm zugemutete Vergrößerung seines elektrischen Zwangszustandes**. Die Ueberwindung dieser Reaktion macht erst die Ausbildung des Feldes möglich. Dabei leistet die felderregende Kraft gegen diese Reaktion eine Arbeit. Und sie ist es, die sich nachher als elektrostatische Energie im Zwangsfelde des Aethers aufgespeichert findet. Der umgekehrte Vorgang tritt ein, wenn ein elektrischer Zwangszustand verschwindet: Dann wird die Reaktion des Feldes zur Aktion, durch deren Vermittlung die aufgespeicherte Feldenergie in andere Energieformen verwandelt werden kann.

Wenn bei O ein magnetischer Zwang entsteht oder verschwindet, bildet sich nach demselben elektromagnetischen Mechanismus ein magnetischer Zwangszustand im Aether aus. Das geschieht durch Arbeitsleistung gegen eine analoge **magnetische Reaktion des Aethers**, und die aufgewendete Arbeit findet sich als magnetische Feldenergie im Aether aufgespeichert.

γ) **Strahlende Aetherenergie.** Bei diesen Prozessen wird, wie man sieht, Energie von der Erregungsstelle O aus in den Aether hinausgeschoben. **Daß solche Energieschiebung immer stattfinden muß, wenn an irgendeiner Aetherstelle gleichzeitig entstehender elektrischer Fluß und senkrecht zu seiner Richtung entstehender magnetischer Fluß zusammentreffen**, läßt sich aus den Beziehungen I und II auch direkt erkennen (s. Fig. 4). Würde in O nur entstehender

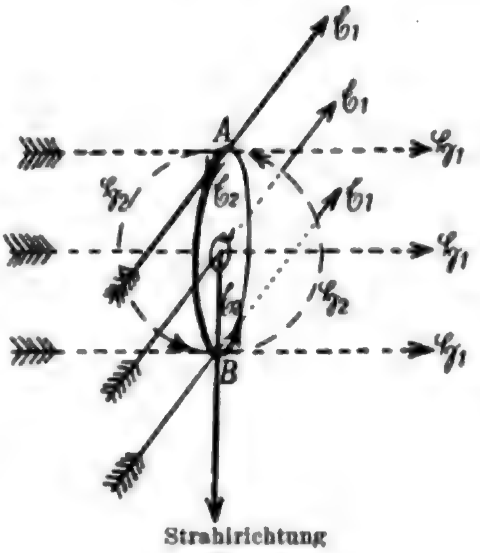
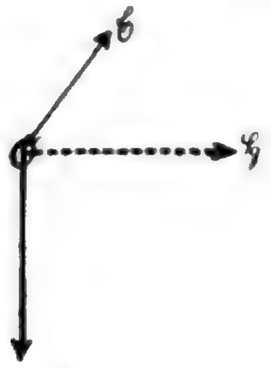


Fig. 4.

elektrischer Zwang $\mathfrak{E}_1$ wirken, so würde, wie Figur 1 zeigte, ein entsprechend gerichteter elektrischer Zwang bei A und B vorhanden sein. Ist gleichzeitig bei O senkrecht zur Richtung von $\mathfrak{E}_1$ entstehender magnetischer Zwang $\mathfrak{H}_1$ vorhanden, so läßt er nach Figur 2 bei A und B einen elektrischen Zwang $\mathfrak{E}_2$ entstehen, der bei A den dort vorhandenen Zwang $\mathfrak{E}_1$ aufhebt, während er denselben bei B verstärkt. $\mathfrak{E}_1$ wird also von O nach B hingeschoben. Mit $\mathfrak{H}_1$ ist es ganz ebenso, kurz, der ganze bei O ursprünglich vorhandene Zustand schreitet — und zwar mit Lichtgeschwindigkeit — senkrecht zur Ebene $\mathfrak{E}_1$ $\mathfrak{H}_1$ fort. Figur 5 legt die Richtung dieses Fortschreitens —

Digitized by Google

die Strahlrichtung — relativ zu den Richtungen von $\mathfrak{H}_1$ und $\mathfrak{E}_1$ noch einmal fest. Das gleichzeitige Vorhandensein von entstehendem elektrischem und magnetischem Zwang senkrecht zueinander bedeutet mit anderen



Strahlrichtung

Fig. 5.

Worten das Vorhandensein einer Kraft, die auf den in der Strahlrichtung liegenden Aether elektromagnetische Energie überträgt. Wir wollen sie den elektromagnetischen **Strahlungsdruck** nennen. Die pro Flächeneinheit übertragene Strahlungsenergie ist dem Produkt $\mathfrak{E}_1 . \mathfrak{H}_1$ proportional (Poyntingscher Satz). Sowohl der entstehende elektrische, wie der entstehende magnetische Zwang übt die in Figur 3 veranschaulichte Gegenkraft auf den Aether aus. Beide setzen sich, wie Figur 4 zeigt, analog dem Strahlungsdruck auf der Front, zu einem Strahlungsgegendruck auf der Rückseite des Impulses zusammen. Das Erregen solcher fortschreitenden elektromagnetischen Strahlung im Aether verlangt, daß man jenen Strahlungsgegendruck durch äußere Kraft überwindet. Das erfordert wieder Arbeitsaufwand, **die aufgewendete Arbeit wird als elektromagnetische Strahlungsenergie mit Lichtgeschwindigkeit durch den Aether fortgetragen.**

2b) **Elektrizität.** Als ein für allemal vorhandene Träger der elektrischen Erscheinungen nimmt die heutige Physik „Atome der Elektrizität", die **Elektronen**, an. Sie sind **Ziel- und Haftpunkte eines radial symmetrischen elektrischen Zwanges im Weltäther, der sich mit dem Quadrate des Abstandes von ihnen verliert** (siehe Fig. 6 die ausgezogenen Linien; vgl. auch den Artikel „Elektron"). Man kann eine elastische Analogie zu ihnen denken in dem Zwangsgebilde, das in einer großen Gallertemasse durch Einbetten einer kleinen unelastischen Kugel entstände; oder auch dadurch in entgegengesetzter Art, daß man eine kleine Gallertekugel entfernte, und die innere Kugelbegrenzung der Gallerte sich auf einen Punkt zusammenziehen ließe. Wie bei diesem Modell gibt es auch im Weltäther solche Zwangsgebilde zweierlei Art, positiven und negativen Vorzeichens, die positive und negative Elektrizität. Indessen hat man bisher nur negative Elektronen wirklich beobachtet, während der entsprechende positive Zwangszustand stets an greifbarer Materie haftend gefunden wird. Daß man das ohne Annahme eines besonderen positiven Elektrizitätsatoms erklären kann, wird weiter unten besprochen werden. Wie es möglich sein kann, daß sich solche Zustände, wie es Elektronen sind, dauernd im Aether erhalten können, darüber fehlt bisher allerdings jede Vorstellung.

α) **Potentielle Energie der Elektrizität.** Genau wie die elastische Masse der erwähnten Gallerte den elastischen Zwangszustand nur ungern erduldet und sich ihm nach Möglichkeit zu entziehen sucht, ist dies mit dem Aether in bezug auf den elektrischen Zwang der Fall. Darum versteht man sogleich, daß die Elektronen sich gegenseitig abstoßen müssen. Denn zwei Elek-

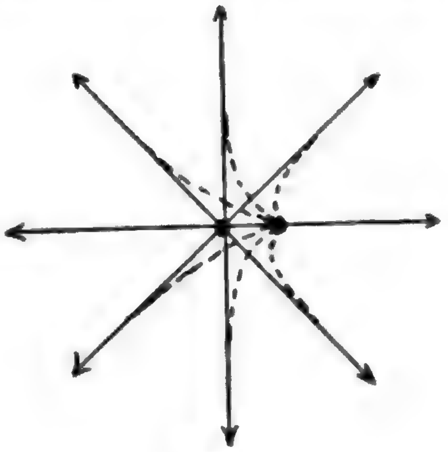


Fig. 6.

tronen an dieselbe Raumstelle bringen heißt, dem Aether einen doppelt so großen Zwang zumuten, als er schon von einem einzigen Elektron erdulden muß. Solange eine äußere Gewalt eine Annäherung nicht erzwingt, werden darum die Elektronen sich so weit voneinander zu entfernen suchen, als es irgend geht. Das bedeutet andererseits, daß man Arbeit aufwenden muß, wenn man Elektronen zusammenpfercht, **und daß in einem Komplex von zusammengedrängten Elektronen potentielle Energie oder Arbeitsfähigkeit steckt, die man wieder gewinnen kann, wenn man die Elektronen ihren Abstand vergrößern läßt.** Man drückt die eben anschaulich gemachten Beziehungen auch so aus: Durch die Nachbarschaft von Elektronen besitzt jede Raumstelle ein elektrisches Potential. Beträgt dasselbe P_e Einheiten, so wird

Digitized by Google

die Arbeit von P_e Arbeitseinheiten erfordert, um ein Coulomb Elektronen aus unendlich großer Entfernung an die Stelle zu bringen. Bringt man eine Elektrizitätsmenge von Q Coulomb an die Stelle, so erfordert das einen Arbeitsaufwand von PQ Arbeitseinheiten, die als potentielle Energie an ihr aufgespeichert und wieder verfügbar werden, wenn die Elektrizitätsmenge Q von der betreffenden Raumstelle aus in sehr weite Entfernung zurückgeschafft wird. Was es bedeutet, wenn man sagt, zwischen zwei Raumstellen 1 und 2 herrsche eine Potentialdifferenz von $P_1—P_2$ Einheiten, ist hieraus ohne weiteres klar. Als Einheit der Potentialdifferenz wird wieder das Volt benutzt.

β) **Kinetische Energie der Elektrizität.** Die Elektronen können im Raume wandern, d. h. die betreffende Zwangsanordnung des Aethers kann von Ort zu Ort fortschreitend übertragen werden. Da sich der Aetherzwang, wie wir sahen, nicht augenblicklich, sondern mit Lichtgeschwindigkeit ausbreitet, so muß die Symmetrieanordnung des zu einem Elektron gehörenden Aetherzwanges gestört werden, sobald man dem Elektron eine Geschwindigkeitsänderung zumutet. Figur 6 gibt mit den gestrichelten Linien schematisch davon eine Anschauung: Die vom Zentrum weiter abstehenden Aethergebiete werden erst ihrem Abstand entsprechend später von der Bewegung ergriffen. Ist schließlich der ganze Wirkungskreis des Elektrons von seiner Wanderung ergriffen, so zeigt das bewegte Elektron eine Anordnung, wie sie in Figur 7 gestrichelt angedeutet ist, das Elektron erscheint „deformiert".

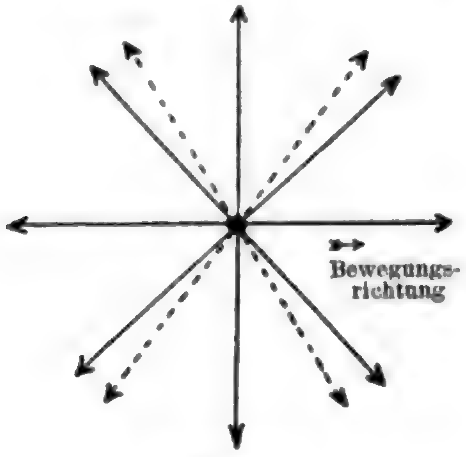


Fig. 7.

Die Notwendigkeit und Art dieser Deformation läßt sich in folgender Weise erkennen: Die Bewegung des Elektrons oder, mit anderen Worten, die Verschiebung des das Elektron bildenden elektrischen Zwanges im Aether muß durch den elektromagnetischen Mechanismus erfolgen, wie er im vorigen Abschnitt beschrieben ist: Auf der Vorderseite des bewegten Elektrons wächst der nach vorne gerichtete elektrische Zwang, auf der Rückseite nimmt der nach hinten gerichtete ab. Nach der Grundbeziehung I entstehen also sowohl vor dem bewegten Elektron wie hinter ihm Wirbel magnetischer Kraft, wie das in Figur 8

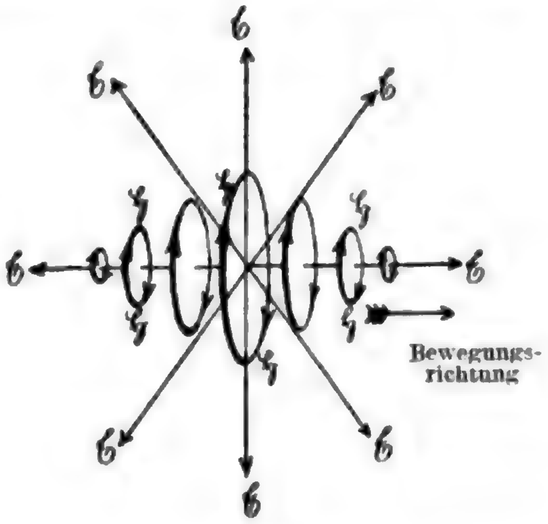


Fig. 8.

angedeutet ist. Nach dem Poyntingschen Satze herrscht also ein Strahlungsdruck, der, wie man sich mit Hilfe von Figur 5 leicht überlegt, vor dem Elektron elektromagnetische Energie von der Bewegungsachse weg nach außen, hinter ihm von außen auf die Bewegungsachse zu schiebt. Bei der Bewegung des Elektrons muß aber die zum Elektron gehörige Energie gleichmäßig vorwärts geschoben werden, d. h. die Energie muß aus jeder um das Elektron geschlagenen Kugel nach vorne vorquellen, von hintenher entsprechend einsinken. Eine solche Energieverschiebung kann, wie eine genaue Rechnung zeigt, nur stattfinden, wenn sich die in Figur 7 gestrichelt angedeutete Deformation des bewegten Elektrons hergestellt hat. Natürlich kann das nicht ohne Arbeitsleistung geschehen; es ist also ein Arbeitsaufwand nötig, um einem Elektron Geschwindigkeit zu erteilen. **Wenn ein Elektron Geschwindigkeit angenommen hat, trägt es die zu seiner „Deformation" aufgewendete Arbeit als kinetische Energie mit sich, um sie wieder abzugeben, wenn man ihm die Geschwindigkeit wieder entzieht.** Dabei nimmt das Elektron dann wieder seine alte Gestalt an.

γ) **Die magnetischen Aeußerungen bewegter Elektronen.** Nach Figur 8 ist ein bewegtes Elektron von Wirbeln magnetischen Zwanges begleitet. Bewegen sich zwei Elektronen einander parallel, so hebt

zwischen ihnen der mit dem einen wandernde magnetische Zwang den mit dem anderen wandernden auf (Fig. 9). Um die der Parallelbewegung entsprechende Energieverschiebung sicherzustellen, müssen sich die beiden Elektronen wieder geeignet deformieren, etwa so, wie es in der Figur 9 gestrichelt angedeutet ist. Das hat zur Folge, daß sich die beiden be-

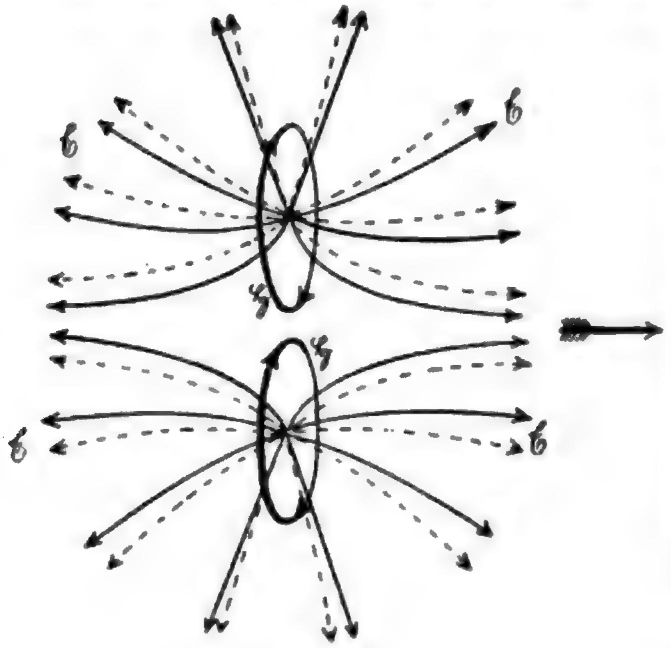


Fig. 9.

wegten Elektronen nicht so stark abstoßen, wie sie es ruhend bei gleichem Abstande tun. Oder: Infolge der Bewegung lagert sich eine magnetische Anziehung über die elektrostatische Abstoßung, die um so größer ist, je größer die Geschwindigkeit der bewegten Elektronen ist. Dies ist die Elementarwirkung, welche den Anziehungs- und Abstoßungskräften elektrischer Ströme zugrunde liegt. Es wird unten darauf zurückgekommen.

Eine weitere für spätere Erörterungen wichtige Elementarwirkung wird auf ein in einem Magnetfelde senkrecht zu seiner Richtung bewegtes Elektron ausgeübt. Man erkennt sie folgendermaßen: Die fein gestrichelten Linien in Figur 10 sollen ein homogenes Magnetfeld $\mathfrak{H}_F$ von der Richtung 1 bezeichnen. Senkrecht zur Ebene des Papiers fliege ein Elektron, das, wie wir sahen, von Wirbeln magnetischer Kraft $\mathfrak{H}_E$ begleitet ist, wie sie die Figur 10 andeutet. Man erkennt, daß der magnetische Zwang $\mathfrak{H}_F$ des Feldes durch den des Elektrons $\mathfrak{H}_E$ bei B vermindert, bei A verstärkt wird, so daß eine Zwangsverteilung resultiert, wie sie durch die stark gestrichelten Linien angedeutet ist. Sie entsteht vor dem bewegten Elektron und verschwindet hinter ihm. Nimmt man den entstehenden elektrischen Zwang dazu, so zeigt die Anwendung des Poyntingschen Satzes (Fig. 5), daß eine Energieschiebung in der Richtung 3 zustande kommen muß, d. h. daß das Elektron eine zu seiner Bewegungsrichtung und der Richtung des Magnetfeldes senkrechte Beschleunigung erfährt. Es muß also eine entsprechende Ablenkung von seiner Bahn erleiden. Man kann leicht erkennen, daß die Beschleunigung in der Richtung 3 um so größer sein wird, je stärker das Feld $\mathfrak{H}_F$ und je größer die $\mathfrak{H}_E$ bestimmende Geschwindigkeit des Elektrons ist.

δ) Ausstrahlung elektromagnetischer Wellen. Wird ein Elektron beschleunigt, so wird seine der schließlichen Geschwindigkeit entsprechend deformierte Gleichgewichtsform nicht sofort erreicht, es tritt vielmehr folgendes ein: die von ihm ausgehenden Kraftlinien werden in unmittelbarer

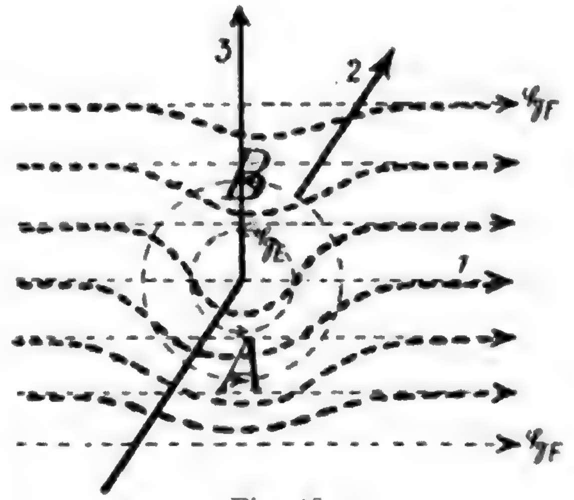


Fig. 10.

Nähe des Haftpunktes so deformiert, wie Figur 6 gestrichelt übertrieben zeigt. Das hat, wie die genaue Rechnung zeigt, zur Folge, daß die zur Formänderung des Elektrons im Sinne der Figur 7 nötige Energieschiebung auf Grund des Poyntingschen Satzes sichergestellt wird. Bei einer entsprechenden Verzögerung des Elektrons kehrt sich das Vorzeichen der Energiewanderung um und die alte Form des Elektrons stellt sich so wieder her.

Findet eine ungleichförmige Beschleunigung, also eine zu- oder abnehmende Beschleunigung des Elektrons statt, so wird die Felddeformation derart, daß zu der eben genannten eine Energieschiebung äquatorial zur Bewegungsrichtung erfolgt oder mit anderen Worten, daß ein elektromagnetischer Strahlungsimpuls ausgelöst wird, mit dem sich ein gewisser Betrag von Strahlungsenergie auf Nimmerwiederkehr von dem Elektron entfernt. Auf Nimmerwiederkehr: denn das Abstoßen dieses Impulses erfolgt, wie die Rechnung ergibt, obwohl es sich nicht mehr leicht anschaulich machen läßt, immer, gleichviel ob es sich um eine Ver-

Digitized by Google

größerung oder Verkleinerung einer Beschleunigung handelt. Die bei einer Vergrößerung abgestoßene Energie kehrt daher nicht wieder zurück wenn man später die Vergrößerung der Beschleunigung durch eine entsprechende Verkleinerung rückgängig macht, sondern es löst sich auch hierbei wieder ein gleicher Impuls ab; lediglich die Richtung der magnetischen und elektrischen Kräfte erscheint umgekehrt, wodurch die Strahlrichtung nicht verändert wird (vgl. Fig. 5). Die einmal abgestoßenen Impulse stellen nun selbständige, im Aether existierende Energiegebilde dar. Der wegwandernde Impuls übt dabei, wie früher gezeigt, den Strahlungsgegendruck aus, dessen Ueberwindung notwendig ist, um die Strahlungsarbeit zu leisten. Die Bedingungen für die Entstehung des Strahlungsimpulses werden um so günstiger, und es wird um so mehr Energie in dem Strahlungsimpuls fortgetragen, je größer die Beschleunigungsänderung ist. Die periodische Ausstrahlung, die in dieser Weise als elektromagnetische Welle von einem hin und her schwingenden Elektron ausgeht, ist das, was wir in einem bestimmten Wellenlängenbereich als Licht empfinden (s. den Artikel „strahlende Aetherenergie"), in einem Bereiche größerer Wellenlängen als strahlende Wärme (vgl. den Artikel „Infrarot"), und was wir im Bereiche sehr großer Wellenlänge in der drahtlosen Telegraphie benutzen (vgl. den Artikel „Elektrische Schwingungen").

2c) Materie. Auch sie denken wir, wie die Elektrizität, atomistisch aufgebaut, aus ein für allemal vorhandenen unendlich kleinen Bausteinen, den Atomen (vgl. den Artikel „Materie").

α) Potentielle Energie der Materie. Auch die Atome sind Haft- und Zielpunkte eines Zwangszustandes im Aether, in dessen Wesen uns allerdings bisher eine tiefere Einsicht fehlt. Man ist hier noch auf dem Standpunkte, den man auch bei der Elektrizität vor Faraday und Maxwell hatte, und muß sich einstweilen damit begnügen, von Atom zu Atom wirkende „Fernkräfte" einzuführen, einer künftigen Entwickelung vorbehaltend, den sie vermittelnden Aethermechanismus aufzudecken. Diese von den Atomen ausgehenden, auf andere Atome anziehend wirkenden Fernkräfte bestimmen den Zusammentritt von Atomen zu Molekülen, von Molekülen zu Körpern. Sie äußern sich weiter in der Gravitation der Massen aufeinander. In allen diesen Fällen erfordert es, im Gegensatz zu den Elektronen, der Arbeitsleistung eines äußeren Zwanges, wenn man die Atome voneinander trennen will, während umgekehrt Arbeit verfügbar wird, wenn sie sich einander nähern. Anders gesprochen: Jede Raumstelle in der Nähe greifbarer Materie besitzt ein materielles Potential von $-P_m$ Einheiten, d. h. es wird die Arbeit von P_m Arbeitseinheiten erfordert, um die Masseneinheit von dieser Stelle aus in die Unendlichkeit zu bringen. Eine Masse von m Einheiten besitzt also in der Unendlichkeit bezogen auf einen Punkt vom Potential $-P_m$ eine potentielle Energie von $-P_m m$ Arbeitseinheiten, die verfügbar werden, wenn sie aus der Unendlichkeit an den Bezugspunkt gebracht wird.

β) Kinetische Energie der Materie. Um der Materie Geschwindigkeit zu erteilen, ist ebenfalls ein Arbeitsaufwand nötig, unter Ueberwindung ihres durch die Masse m gemessenen „Trägheitswiderstandes." Diese an ihr aufgewendete Arbeit trägt sie durch die erlangte Geschwindigkeit als kinetische Energie mit sich fort. Entzieht man ihr ihre Geschwindigkeit, so wird diese Energie wieder verfügbar. Die kinetische Energie der Materie erweist sich dem halben Produkt aus Masse und Geschwindigkeitsquadrat proportional. Die Uebertragung dieser Beziehung auf das Elektron führt zu dem Begriff „Masse des Elektrons". Sie muß sich von der Geschwindigkeit abhängig zeigen, sobald die kinetische Energie des Elektrons schneller als das Quadrat der Geschwindigkeit wächst. Eine solche kompliziertere Abhängigkeit ist in der Tat beobachtet worden (vgl. den Artikel „Elektronen").

γ) Beziehungen zwischen der Materie und der Elektrizität. Wie wir die Elektronen als Aethergebilde annahmen, so kommt man heute aus mancherlei Gründen mehr und mehr dazu, die Atome als Elektronengebilde anzusehen. Namentlich die Erscheinungen der Spektroskopie zwingen uns, die Atome als stabile Anordnungen von mehr oder weniger zahlreichen Elektronen, gewissermaßen als kleine Weltsysteme aus Elektronen, zu denken. Wenn die beteiligten Elektronen um ihre Gleichgewichtslage im Atom Schwingungen ausführen, sendet das Atom nach dem S. 451 beschriebenen Mechanismus ein charakteristisches Licht aus.

Da die Bewegung eines Elektrons im Aether nach Abschnitt 2b nichts anderes ist, als ein Sichfortschieben eines Aetherzustandes, so erscheint auch die Bewegung der Materie in dieser Weltanschauung als ein Sichfortschieben eines allerdings äußerst komplizierten Aetherzustandes. Dabei würden also die wandernden Körper gewissermaßen

Digitized by Google

in jedem Augenblick in Aether zerfallen und gleichzeitig an der benachbarten Raumstelle neu aufgebaut.

Wenn dem Atom Elektronen seines normalen Bestandes gewaltsam entzogen werden, wird es, als sogenanntes positives Atomion, zur Haftstelle des positiven elektrischen Zwangszustandes; es erscheint positiv elektrisch geladen. Ebenso bilden sich positive Molekülionen. Auch negative Atom- und Molekülionen können entstehen, indem neutrale Atome oder Moleküle mit Elektronen beladen werden können. So ist das Auftreten des positiven elektrischen Zwangszustandes (gekennzeichnet durch einen negativen Wert des Potentials) lediglich der Ausdruck eines Mangels von Elektronen; er ist gewissermaßen eine Störung in dem kleinen Weltsystem, welches wir Atom nennen. Diese Anschauung führt sofort zu der Erklärung des Erfahrungssatzes, daß beim Entstehen irgendeiner Elektrizitätsmenge stets die gleichgroße entgegengesetzter Art auftritt (Satz von der Erhaltung der Elektrizität). Und die Kraftwirkungen, die zwischen all den genannten elektrisch geladenen Gebilden bestehen müssen, erklären folgerichtig alle die Erscheinungen, wie sie die Erfahrung an elektrisierten Körpern wirklich zeigt: gleichnamig elektrisierte Körper stoßen sich ab, ungleichnamig elektrisierte ziehen sich an. So erkennen wir: Die an Materie haftenden Elektrizitäten bieten durch ihre Beziehung zum Aether die Handhaben, um einen Energieaustausch zwischen dem Aether und der Materie zu vermitteln.

3. Energieformen. Wenn wir die magnetische Feldenergie, weil sie stets mit Bewegung von Elektrizität verbunden erscheint, als die kinetische Energie des Aethers, und die elektrostatische Feldenergie als die potentielle Energie des Aethers bezeichnen, so können wir als Ergebnis des vorigen Abschnittes aussprechen, daß jeder der drei Energieträger in zwei Formen, potentiell und kinetisch, Energie aufnehmen kann. Dabei besteht für alle drei die gleiche Arbeitsbeziehung zwischen den beiden Formen, daß stets die eine in demselben Betrage entsteht, als die andere verschwindet: Das Energieprinzip für jede Welt, in der nur ein Energieträger ins Spiel kommt.

Dieses einfache Schema mit seinen 6 Energieformen reicht in der Tat aus, das Wechselspiel der physikalischen Erscheinungen logisch zu umfassen. Wir können diese 6 Energieformen die „rationellen Energieformen der Physik" nennen. Die praktische Physik unterscheidet indessen auf Grund der Sinnesempfindungen, die uns von den Naturvorgängen Kenntnis geben, in anderer Weise. Sie spricht von mechanischer Energie, Wärmeenergie, chemischer Energie, Lichtenergie, elektrischer Energie.

Das Verhältnis dieser praktischen Energieformen zu den 6 rationellen Formen ist folgendes:

Mechanische Energie ist kinetische oder potentielle Energie der Materie, wie sie sich grobsinnlich durch unseren Tastsinn offenbart; gewissermaßen die makroskopische Darstellung der Energie der Materie. Ihre mikroskopischen Darstellungen sind die Wärmeenergie und die chemische Energie. Die chemische Energie (vgl. den Artikel „Chemische Energie") ist nämlich die Arbeitsfähigkeit, die den Körpern durch die Anordnung ihrer Atome im Molekül innewohnt. Die Wärmeenergie ist die Arbeitsfähigkeit, die die Körper durch die Bewegung ihrer kleinsten Teilchen haben (vgl. den Artikel „Kinetische Theorie der Materie"). In beiden Fällen reichen unsere Sinne nicht aus, die Anordnung und Bewegung der kleinsten Teilchen im einzelnen wahrzunehmen; sondern es stellt sich ihnen immer nur das Zusammenwirken unzähliger solcher Teilchen in einheitlich charakterisierten Gesamtempfindungen dar. Lichtenergie im weitesten Sinne ist strahlende Aetherenergie, deren Wesen im Abschnitt 2 genau charakterisiert ist. Ebenso ist das Wesen der elektrischen Energie dort klargelegt. Man faßt als elektrische Energie die beiden durch die Elektronen vermittelten Formen der Aetherenergie zusammen, wie die beiden Formen der Energie der Materie durch das Wort mechanische Energie. Es gibt übrigens auch auf dem Gebiete der greifbaren Materie die der strahlenden Aetherenergie entsprechende Form; die Schallenergie ist ein Beispiel. Doch pflegt man sie nicht als besondere Form hervorzuheben.

Unsere Aufgabe ist jetzt, zu zeigen, wie die vier ersten Energieformen in elektrische Energie verwandelt werden können, d. h. wie durch mechanische, chemische, Wärme- und Lichtvorgänge EMKK entwickelt und in elektrischen Maschinen zur Energieumsetzung ausgenutzt werden können. Das soll aus didaktischen Gründen in folgender Reihenfolge geschehen: EMKK, die tätig sind auf Rechnung

a) von Wärmeenergie,
b) von chemischer Energie,
c) von mechanischer Energie,
d) von strahlender Aetherenergie.

Jede dieser EMKK kann als Generatorkraft wie als Verbraucherkraft (Gegen-EMK)

Digitized by Google

tätig sein. So können wir über die Energieprozesse, an denen der elektrische Energieträger beteiligt ist, folgende systematische Uebersicht geben:

A. Generatoren: In ihnen sind EMKK tätig auf Kosten von	B. Verbraucher: In ihnen sind Gegen-EMKK tätig zum Gewinn von
a) Wärmeenergie.	
	Spannungsabfall in stromdurchflossenen Leitern
Thomsoneffekt	Thomsoneffekt
Peltiereffekt	Peltiereffekt
Thermoelemente	Thermoelemente.
b) Chemischer Energie.	
Elektrolytische Abscheidung	Elektrolytische Zersetzung
Galvanische Elemente	
Akkumulatoren bei der Entladung	Akkumulatoren bei der Ladung.
c) Mechanischer Energie.	
Elektrophor	Elektrophor
Influenzmaschine als Generator	Influenzmaschine als Motor
Dynamogeneratoren	Dynamomotoren
	Telegraphenapparat
Telephonempfänger	Telephonhörer
Konzentrationsketten.	Elektrolytische Polarisation durch Konzentrationsänderung.
d) Strahlender Aetherenergie.	
Lichtabsorption	Lichterregung
Empfänger für drahtlose Telegraphie	Sender für drahtlose Telegraphie
Transformator (Sekundärseite)	Transformator (Primärseite).

4. Der Mechanismus der elektromotorischen Kräfte. 4a) Auf Rechnung von Wärmeenergie tätige EMKK α) Spannungsabfall in stromdurchflossenen Leitern. Die praktisch bedeutsamste auf Rechnung von Wärmeenergie tätige EMK tritt bei der Elektrizitätsleitung auf und bewirkt als Gegen-EMK, daß dabei stets der wandernden Elektrizität Energie entzogen und in Wärme (Joulesche Wärme) verwandelt wird. Bei metallischen und flüssigen Leitern ist die Gegen-EMK der Stromstärke i proportional $= -iw$. Zwischen zwei Aequipotentialflächen eines Leiters von der Potentialdifferenz e bildet sich also ein solcher Strom, daß stets $e - iw = 0$ oder $e = iw$ ist (Ohmsches Gesetz). $-w$ ist die der Stromstärke 1 entsprechende Gegen-EMK und wird Leitungswiderstand genannt (vgl. Näheres in den Artikeln „Elektrizitätsleitung“ und „Elektrischer Widerstand“). Für zylindrische Leiter ist $w = \varkappa \frac{l}{q}$ (l Länge, q Querschnitt, $\varkappa$ spezifischer Widerstand). Für gasförmige Leiter ist die Gegen-EMK eine kompliziertere, durch sehr verschiedenartige physikalische Umstände bestimmte Funktion der Stromstärke (vgl. den Artikel „Elektrizitätsleitung in Gasen“).

Der Mechanismus dieser Gegen-EMK ist folgender: Die Leiter sind Körper, zwischen deren Molekülen sich entweder Elektronen oder Ionen frei bewegen können. In den Metallen sind es freie, aus dem Molekülverbande ausgeschwärmte Elektronen, die den Elektrizitätstransport vermitteln, in den flüssigen Leitern (Elektrolyten) sind es durch Dissoziation der neutralen Moleküle unter dem Einflusse des Lösungsmittels entstandene Ionen, in den gasförmigen Leitern sind es Ionen, die durch erzwungene Dissoziation der Gasmoleküle entstehen (Näheres siehe im Artikel „Elektrizitätsleitung“). Wird nun in dem zwischen den Molekülen des Leiters vorhandenen Aether der elektrische Zwangszustand erregt, so fangen die in ihm schwimmenden Elektronen oder Ionen an in entsprechenden Richtungen zu wandern und wandeln dabei ihre potentielle Energie in kinetische um, bis sie mit einem Atom oder Molekül zusammenstoßen und ihm

Digitized by Google

ihre kinetische Energie nach den Stoßgesetzen übertragen. Dies immerzu, so daß fortwährend im ganzen Leitungsgebiete Verwandlung von potentieller Energie der Elektronen in kinetische Energie der Moleküle, d. h. in Wärme stattfindet. Die mathematische Diskussion des Vorgangs zeigt, daß die so — gewissermaßen durch Reibung der Elektrizität an der Materie — hervorgebrachte Gegen-EMK in der Tat der Stromstärke proportional sein muß.

β) Thomsoneffekt. Erwärmt man einen Leiter an einer Stelle, während man eine andere Stelle durch Kühlen auf tiefer Temperatur hält, so wird zwischen diesen beiden Stellen eine EMK wirksam, die von der kalten zu der warmen Stelle gerichtet ist. Die umherschweifenden Elektronen oder Ionen müssen nämlich stets mit dem Leiter im Wärmegleichgewicht stehen, d. h. sie müssen dieselbe mittlere kinetische Energie haben, wie die neutralen Moleküle des Leiters. Sie verhalten sich in den Zwischenräumen zwischen denselben genau wie die Moleküle eines in einem Lösungsmittel aufgelösten Stoffes und üben durch die Zusammenstöße mit den Molekülen einen dem osmotischen Druck analogen „elektrosmotischen Druck" aus. Wird die Temperatur des Leiters an einer Stelle erhöht, so wächst auch der elektrosmotische Druck und die Elektronen strömen solange in der Richtung des Wärmestromes, bis der durch die Elektronenanhäufung an der kalten Stelle auftretende elektrische Gegendruck dem elektrosmotischen Drucküberschuß das Gleichgewicht hält. Die zur kalten Stelle gedrängten Elektronen erhalten so auf Kosten von kinetischer Energie der Moleküle potentielle Energie, kurz es entsteht durch den Wärmestrom eine dem Wärmestrom entgegengerichtete EMK. Sie muß sich darin äußern, daß ein elektrischer Strom in einem solchen Leiter eine größere oder kleinere Wärmeentwickelung ergibt, als der Jouleschen Wärme entspricht, je nachdem er seine Elektronen mit dem oder gegen den Wärmestrom führt; je nachdem also jene EMK als Verbraucher- oder Generatorkraft ausgenutzt wird. Das ist aber gerade das, was im sogenannten Thomsoneffekt beobachtet wird. Das elektrische Feld, welches den Strom treibt, wird in dem einen Falle von jener EMK geschwächt, im anderen Falle verstärkt, so daß die bewegten Elektronen oder Ionen zwischen zwei Zusammenstößen mit Molekülen entweder weniger oder mehr kinetische Energie aufnehmen, als sie es tun, wenn das Temperaturgefälle fehlt.

γ) Peltiereffekt. Bringt man zwei verschiedene Leiter 1 und 2 (Fig. 11) in Berührung, so muß von dem Leiter 1, in dem die Elektronen oder Ionen den größeren elektrosmotischen Druck haben sollen, Elektrizität in den Leiter 2 gedrückt werden. So wirkt analog wie beim Thomsoneffekt, sowohl bei A wie bei B, eine EMK im Sinne der Pfeile von 2 nach 1. Schickt man einen Strom im Sinne der gefiederten Pfeile, so wird das ihn treibende Feld

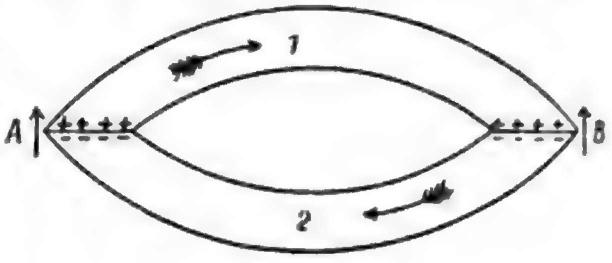


Fig. 11.

bei B geschwächt, bei A verstärkt. Infolgedessen erfahren bei B die passierenden Elektronen zwischen zwei Zusammenstößen eine kleinere Beschleunigung, bei A eine größere als in einem homogenen Leiter; um unter diesen Umständen die mittlere kinetische Energie der Moleküle und Elektronen gleich zu halten, muß also bei B kinetische Energie von den Molekülen auf die Elektronen, bei A von den Elektronen auf die Moleküle übergehen, d. h. bei B tritt Abkühlung, bei A Erwärmung auf. Das ist es, was beim Peltiereffekt beobachtet wird.

δ) Thermoelemente. Was wir unter *γ* gefunden haben, ist, etwas anders ausgedrückt: durch den Elektronenstrom wird Wärme von B weggenommen und nach A auf höhere Temperatur überführt. Das ist ein Vorgang, der nach dem zweiten Hauptsatz der Wärmelehre nur erzwungen werden kann, dem sich also eine Kraft widersetzt. Daher ist zu schließen, daß mit dem Eintreten einer Temperaturdifferenz zwischen A und B eine EMK in dem Kreise auftritt, die sich dem Elektronenstrom in der Richtung der gefiederten Pfeile widersetzt. Heizt man also A von außen und kühlt B ab, so ist in der Kombination unserer zwei Leiter ein Strom im entgegengesetzten Sinne der gefiederten Pfeile zu erwarten. Das tritt in der Tat bei den sogenannten Thermoelementen ein. Der Mechanismus ist der: Mit der Temperatur nimmt der elektrosmotische Druck in 2 schneller zu wie in 1, so daß die EMKK bei A und B mit zunehmender Temperatur kleiner werden. Wird A auf höhere Temperatur erhitzt wie B, so heben sich die EMKK bei A und B nicht mehr auf, sondern es bleibt ein Ueberschuß im genannten Sinne, der den Thermostrom bewirkt. Man erkennt, daß Thomsoneffekt, Peltiereffekt, Thermokraft stets kombiniert auftreten müssen, und daß sie im Grunde

Digitized by Google

nur verschiedene Aeußerungen ein und desselben molekularen Mechanismus sind (Näheres s. im Artikel „Thermoelektrizität").

Es sei noch darauf hingewiesen, daß die sogenannten glühelektrischen Erscheinungen (vgl. den Artikel „Glühelektrische Erscheinungen") gestatten, die Thermo-EMKK mit Metallen ohne direkte Berührung zu erreichen. Bei Glühtemperatur wird nämlich der elektrosmotische Druck der Elektronen so groß, daß die Elektronen durch die Oberfläche hinausgetrieben und so EMKK gebildet werden.

4b) EMKK auf Rechnung von chemischer Energie. Ist bei dem durch Figur 11 veranschaulichten Versuche Leiter 2 ein Metall, 1 eine wässerige Lösung eines seiner Salze, also ein Elektrolyt, so treten außer der EMK des Thomsoneffektes noch andere weit größere bei A und B auf. In Figur 11 sei z. B. 2 Kupfer, 1 eine Kupfersulfatlösung. Wenn man einen Strom zirkulieren läßt, der die Elektronen in der Richtung der gefiederten Pfeile treibt, so tritt bei A eine Auflösung von Kupfer ein, bei B eine Abscheidung, oder anders ausgedrückt, es wird gewissermaßen chemische Energie durch die Elektronen von B nach A transportiert. Denn Auflösung von Kupfer bedeutet nach Abschnitt 4 Verbrauch, Abscheidung Gewinn von chemischer Energie. Als Tauschenergie kommt lediglich die von der Elektrizität mitgeführte Energie in Betracht. Darum muß der Elektrizität bei A Energie entzogen, bei B Energie erteilt worden sein; oder bei A muß auf Rechnung chemischer Energie eine Verbraucher-, bei B eine Generator-EMK tätig sein. Um sie zu erklären, führte Nernst den fruchtbaren Begriff des elektrolytischen Druckes („Lösungstension") ein: Wie Zucker in Berührung mit Wasser einen Lösungsdruck entwickelt, der so lange Zuckermoleküle in Lösung treibt, bis der osmotische Druck der Zuckermoleküle in der Lösung dem Lösungsdruck gleich ist, so wirft infolge der Lösungstension ein Metall positive Metallionen in die Lösung. Die an der Oberfläche zurückbleibenden Elektronen suchen die hinausgetriebenen positiven Ionen zurückzuholen; wenn die Lösungstension ebensoviele positive Ionen in der Sekunde aus dem Metalle hinauswirft, wie die zurückgebliebenen Elektronen zurückholen, so besteht Gleichgewicht. An der Grenzfläche sind dann im Innern des Metalles Elektronen, in der Lösung positive Ionen zusammengedrängt: wir haben eine sogenannte elektrische Doppelschicht. Zwischen den Belegungen derselben herrscht natürlich ein starkes elektrisches Feld, welches ein hineingeratendes Elektron vom Metall in die Lösung wirft und ihm dabei entsprechende Energie erteilt. Umgekehrt erfordert es Arbeitsaufwand, ein Elektron von der Lösung ins Metall zu bringen. Kurz wir haben die EMK, wie wir sie zur Erklärung der Elektrolyse für notwendig erkannt haben. Denn wird ein Strom in der Kombination erregt, der die Elektronen in der Richtung des gefiederten Pfeiles führt, so tritt folgendes ein: Der Elektronenseite der Doppelschicht bei B strömen aus dem Metallinnern Elektronen zu, so daß das Gleichgewicht der Doppelschicht gestört wird, und in das Metall mehr positive Ionen zurückgeholt werden, als durch die Lösungstension austreten. Die zurückgeholten neutralisieren sich mit den überschüssigen Elektronen, und es schlägt sich Kupfer nieder. Durch Dissoziation von neutralen Molekülen wird immer wieder für neue Ionen in der durch den Prozeß verarmten Grenzschicht der Lösung gesorgt. Bei B wandern umgekehrt von der Elektronenseite der Doppelschicht Elektronen in das Metallinnere, der positiven Seite strömen negative Ionen zu. Hier findet also eine Gleichgewichtsstörung im umgekehrten Sinne statt: Die Lösungstension wirft mehr positive Ionen in die Lösung, als von ihr zurückkommen, das Kupfer löst sich auf. Auch hier wird der Ueberschuß an positiven und negativen Ionen in der Grenzschicht durch Neutralisation ausgeglichen. Da nun die Lösungstension bei verschiedenen Metallen verschieden groß ist, bei den edlen Metallen klein, bei den unedlen groß, so ist auch die „Stärke" der entsprechenden Doppelschichten bei den ersteren klein, bei den letzteren groß. Machen wir also den Versuch mit zwei Metallen, so wie in Figur 12

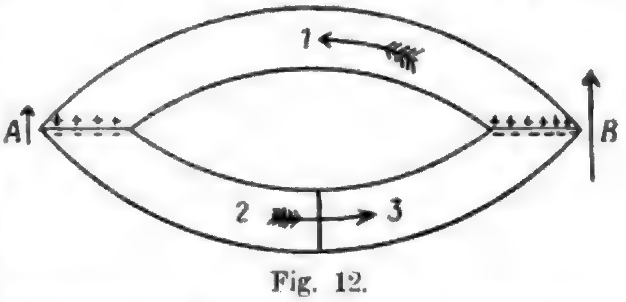


Fig. 12.

angedeutet, wo 2 z. B. Kupfer, 3 Zink, 1 verdünnte Schwefelsäure sei, so wird bei A im Sinne des Pfeiles eine kleine, bei B eine große EMK wirksam sein, es bleibt im ganzen ein Ueberschuß, welcher dauernd Elektronen in Richtung des gefiederten Pfeiles treibt. Dabei muß sich bei B Zink auflösen, bei A Kupfer niederschlagen. Dies ist das Schema eines galvanischen Elementes, speziell des Daniellschen Elementes. Auf Nebenerscheinungen, die praktisch

Digitized by Google

dieses einfache Schema komplizieren, auch auf den Zusammenhang zwischen der von dem Element gelieferten elektrischen und der bei den betreffenden chemischen Prozessen freiwerdenden Energie kann hier nicht eingegangen werden. Darüber wird eingehend in dem Artikel „Galvanische Ketten" gesprochen. Nur darauf sei hingewiesen, daß häufig die Elektrodenoberflächen beim Stromdurchgange durch sekundäre chemische Prozesse so verändert werden, daß sich Stoffe mit anderen Lösungstensionen an ihnen bilden. Macht man z. B. den Versuch (Fig. 11) mit Blei bei 2 und verdünnter Schwefelsäure bei 1, so wird an der Grenzfläche, von der die Elektronen in dem Blei durch den Strom weggeführt werden (der Anode), Bleisuperoxyd gebildet, während die Kathode unverändert bleibt. Bleisuperoxyd hat im Verhältnis zum Blei eine sehr große Lösungstension, darum wird durch die Bildung des Bleisuperoxyds eine Gegen-EMK in dem Kreise geweckt, durch deren Ueberwindung die den Strom erregende EMK die chemische Arbeit des Bleisuperoxydbildens leistet. Läßt man die den Strom erregende EMK zu wirken aufhören, so wird jetzt die Kombination Bleisuperoxyd-Blei als Element arbeiten und einen dem „Ladungs"-Strom entgegengesetzten „Entladungsstrom" durch den Kreis treiben, wobei sich das Bleisuperoxyd allmählich wieder in Blei verwandelt. So wird die ursprünglich aufgewendete elektrische Energie wieder zurückgewonnen. Dieser Versuch ist die Grundlage für die sogenannten Akkumulatoren, die Aufspeicherungselemente für elektrische Energie (Näheres siehe in den Artikeln „Elektrochemie" und „Galvanische Ketten").

So fruchtbar nun auch der Begriff Lösungstension sich für die theoretische Beherrschung der galvanischen Elemente und der Elektrochemie überhaupt erwiesen hat, so ist doch zu sagen, daß er uns den Mechanismus der betreffenden Prozesse nicht weiter aufklärt. Wie das Hinauswerfen positiver Ionen aus den Metallen zustande kommt, darüber hat man sich bisher noch keine befriedigenden Vorstellungen machen können. Wenn wir annehmen, daß primär die neutralen Metallmoleküle in Lösung gehen, daß sie dann wie Elektrolyte im Lösungsmittel dissoziiert werden, und daß nun der in der Lösung größere elektrosmotische Druck der Elektronen die bei der Dissoziation entstandenen in das Metall zurücktreibt, so haben wir den Vorgang wenigstens auf andere uns bekannte zurückgeführt. Doch harren hier noch viele Fragen einer zuverlässigen Beantwortung.

4c) Elektromotorische Kräfte auf Rechnung von mechanischer Energie. Das Wesen der EMK-Erzeugung besteht prinzipiell immer darin, daß Elektronen durch geeignete Wechselwirkungen mit den beiden anderen Energieträgern entgegen ihren Abstoßungskräften zusammengepfercht werden. Bei den chemischen EMKK geschah dieses Zusammenpferchen dadurch, daß die positiven Ionenbestandteile der Metallmoleküle gewaltsam von ihren Elektronen entfernt und in die Lösung gebracht wurden; hier kommen sie also gleich primär mit potentieller Energie in Aktion. Bei den Thermo-EMKK geschah es durch Stöße von seiten der Moleküle auf die Elektronen; hier treten also die Elektronen primär mit kinetischer Energie in Aktion, und es geht erst sekundär ihre kinetische Energie in potentielle über. Gewaltsame Trennung der beiden elektrischen Bestandteile von Molekülen oder Atomen einerseits, Stöße auf die Elektronen von Seiten der Moleküle und Atome andererseits sind auch die beiden Mittel, durch die es gelingt, EMKK auf Rechnung von mechanischer Energie zu erzeugen. Nur treten die beiden Vorgänge hier nicht in molekularer Unordnung, sondern in makroskopischer Ordnung zusammengefaßt in Erscheinung. Die entsprechenden beiden Wege sind folgende:

α) Es seien 1 und 2 in Fig. 13 zwei Metallplatten, die durch eine möglichst dünne

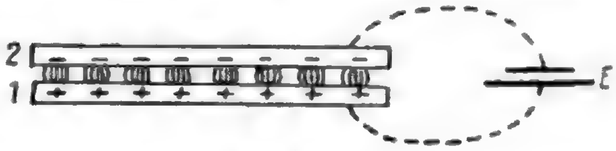


Fig. 13.

Isolationsschicht voneinander getrennt sind. Durch Verbindung derselben mit den beiden Polen irgendeiner EMK, z. B. eines galvanischen Elementes E, seien seine Elektronen z. B. von 1 nach 2 getrieben, so daß die beiden Platten nach Aufhebung der Verbindung mit dem Element eine elektrische Doppelschicht repräsentieren. Die auf 2 liegenden Elektronen üben dabei aufeinander nur kleine Abstoßungskräfte aus, weil der von ihnen ausgehende negative Aetherzwang durch die auf Platte 1 befindlichen positiven Ionen kompensiert wird: die von den Elektronen auf 2 ausgehenden Kraftlinien sind gewissermaßen durch die benachbarten positiven Atomionen gefesselt. Natürlich ziehen sich deshalb die beiden Flächenladungen von 1 und 2 mit beträchtlicher Kraft an. Da die Leiteroberfläche den Elektronen und Ionen den Austritt nicht gestattet, so muß sich die Anziehungskraft zwischen den Elektrizitäten als mechanische

Digitized by Google

Kraft zwischen den beiden Platten äußern. Und wenn man ihr entgegen die Platten trennt, so trägt man mit der Platte 2 die auf ihr befindlichen Elektronen unter mechanischer Arbeitsleistung weg. Da dabei die Fesseln ihrer Kraftlinien gelöst werden, entwickeln sie jetzt frei ihr elektrisches Zwangsfeld im Aether, und damit treten die abstoßenden Kräfte aufeinander vollwertig in Erscheinung, es wird eine EMK gebildet. Kurz gesagt: EMKK, welche eine Umwandlung mechanischer Energie in elektrische gestatten, entstehen dadurch, daß man elektrische Doppelschichten mechanisch auseinander reißt.

An Stelle der Metallplatte 1 kann man auch eine Platte aus einem geeigneten Nichtleiter verwenden, die durch Reibung elektrisiert ist (Fig. 14). Diese Anordnung

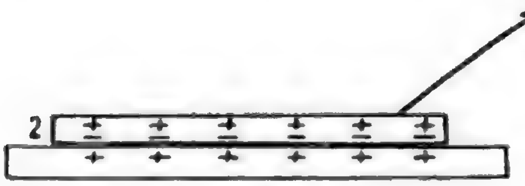


Fig. 14.

ist der sogenannte Elektrophor. Die Platte 1 ist dann selbst Träger der EMK, welche die Doppelschicht an der Berührungsfläche erzeugt, indem sie die Elektronen in der Platte 2 anzieht oder abstößt, und die hilfselektromotorische Kraft E ist überflüssig. Man muß dann die Platte 2, während sie in Berührung mit dem Nichtleiter ist, zur Erde ableiten, um die auf der oberen Fläche von 2 entstehende entgegengesetzte Ladung abzuleiten. Hebt man dann 2 von 1 ab, so entsteht wieder die EMK, die man durch Berührung einem isolierten Konduktor mitteilt. Nun läßt sich der Vorgang immer in der gleichen Weise wiederholen, während sich die dem Konduktor mitgeteilte EMK betätigt. Die sogenannten Influenzmaschinen sind Anordnungen, die diese ganzen Vorgänge, z. B. durch Rotation gewisser Teile relativ zu anderen feststehenden, dauernd in rascher Folge wiederholen oder kontinuierlich wirkend gestalten. Die nähere Ausführung dieser Maschinen siehe im Artikel „Elektrische Influenz". Diese Maschinen können auch, allerdings nur mit einem geringen Wirkungsgrade, als Motore arbeiten, d. h. unter Ausnutzung ihrer EMK als Verbraucherkraft für zugeführte elektrische Energie.

Auch die EMK, die bei der sogenannten Reibungselektrizität entsteht, sowie diejenige, die bei dem Hindurchleiten von nichtleitenden Flüssigkeiten durch Kapillaren auftritt, wird einem solchen mechanischen Auseinanderreißen von elektrischen Doppelschichten verdankt. Nur ist bisher nicht aufgeklärt, durch welche Kräfte diese Doppelschichten an der Trennungsfläche zweier Nichtleiter geschaffen werden. Ebenso gehört die EMK der sogenannten Konzentrationsketten hierher, die sich als polarisierende Gegen-EMK in einem stromdurchflossenen Elektrolyten bildet, indem sich infolge der verschiedenen Wanderungsgeschwindigkeit der positiven und negativen Ionen ein Konzentrationsgefälle in dem Elektrolyten herstellt (Näheres hierüber s. in dem Artikel „Elektrolytische Leitfähigkeit").

β) Aus Abschnitt 2 wissen wir, daß ein in einem Magnetfeld senkrecht zu den Induktionslinien bewegtes Elektron eine Beschleunigung senkrecht zur Bewegungsrichtung und zur Feldrichtung erfährt, wie es in Figur 15 dargestellt ist. Es sei nun a b in

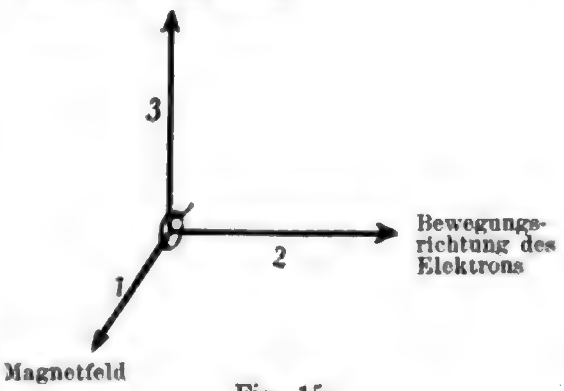


Fig. 15.

Figur 16 ein Leiter, z. B. ein Kupferdraht, der so von einem Strome durchflossen sei, daß die Elektronen in der Richtung 2 wandern. Dann folgt nach Figur 15, daß alle wandernden Elektronen durch das Magnetfeld in der

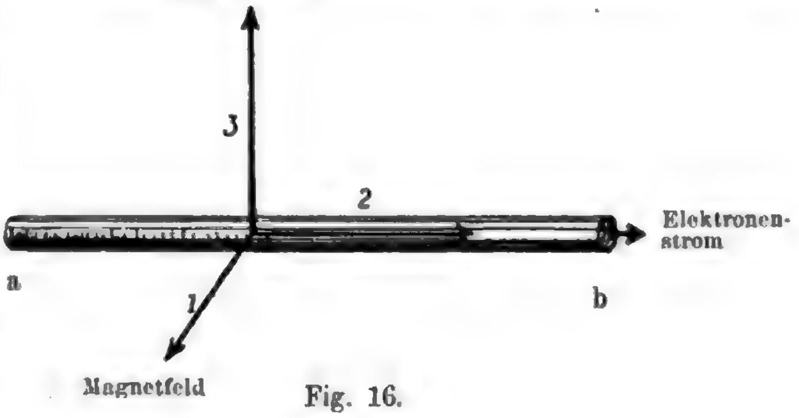


Fig. 16.

Richtung 3 beschleunigt werden müssen. Sie nehmen kinetische Energie auf und übertragen sie bei den Zusammenstößen mit den Kupfermolekülen auf die Gesamtmasse des Kupferdrahtes, **der so einen Kraftantrieb in der Richtung 3 erfährt.** Die Erfahrung zeigt, daß diese Kraft K der Stromstärke J, der magnetischen Induktion B und der Drahtlänge l proportional ist, es gilt bei geeigneter Wahl der Maßeinheiten K = BJl (vgl. den Artikel „Magnetfeldwirkungen"). Man lasse die Kraft K gegen ein an den Draht gehängtes Gewicht P arbeiten, und den Draht mit dem Gewicht in der Zeit t um die Strecke s heben, so wird eine mechanische Leistung von $\frac{JBls}{t}$ gewonnen. Sie kann nur dem Strome J entzogen sein; längs diesem muß also bei der Bewegung des Drahtes im Magnetfeld eine Gegen-EMK E wirksam werden, und es muß

$$\frac{JBls}{t} = -JE$$

sein, oder $E = -\frac{Bls}{t}$. Da $\frac{Bls}{t}$ die Zahl der in der Zeiteinheit von dem Drahte geschnittenen Induktionslinien ist, so ist mit dieser Gleichung das Faradaysche Induktionsgesetz ausgesprochen; E heißt die EMK der Induktion. Sie wirkt bei dem geschilderten Versuche als Verbraucherkraft dem fließenden Strome entgegen. Würde man umgekehrt die Kraft P gegen K arbeiten lassen, also den Draht a b mit dem Gewicht P um S sinken lassen, so würde die EMK der Induktion auf Kosten mechanischer Energie als Generatorkraft wirken und den Strom J verstärken.

Die EMK der Induktion läßt sich leicht direkt nachweisen und in ihrem Wesen erkennen. Der Kupferdraht a b liege (siehe Fig. 17) in der Richtung 3 und werde in der Richtung 2 sich selbst parallel bewegt. Nun müssen nach Figur 15 alle freien Elektronen Beschleunigung in Richtung 3 erfahren und an dem Ende b zusammengedrängt werden. Ist b mit a leitend verbunden, so entsteht unter dem Einfluß der so entstandenen EMK ein Induktionsstrom. Die Energie, die er trägt, wird auf Kosten der Kraft K gewonnen, welche die in Bewegung gesetzten Elektronen nach Figur 16 auf den Leiter hervorbringen. Sie ist nach Figur 15 der Richtung 2 entgegengesetzt. Man hat hiermit die sogenannte Lenzsche Regel, die besagt: Der induzierte Stromträger erfährt vom induzierenden Magnetfelde eine Kraftwirkung, die sich stets der induzierenden Bewegung entgegenstemmt. In der Ueberwindung dieser Gegenkraft liegt das Wesen der Energieumwandlung, die durch den Induktionsvorgang ermöglicht wird.

Macht man sich klar, daß ein Magnetfeld stets nur durch bewegte Elektrizität erzeugt werden kann, und daß dauernde Elektrizitätsbewegung nur in einer geschlossenen Bahn

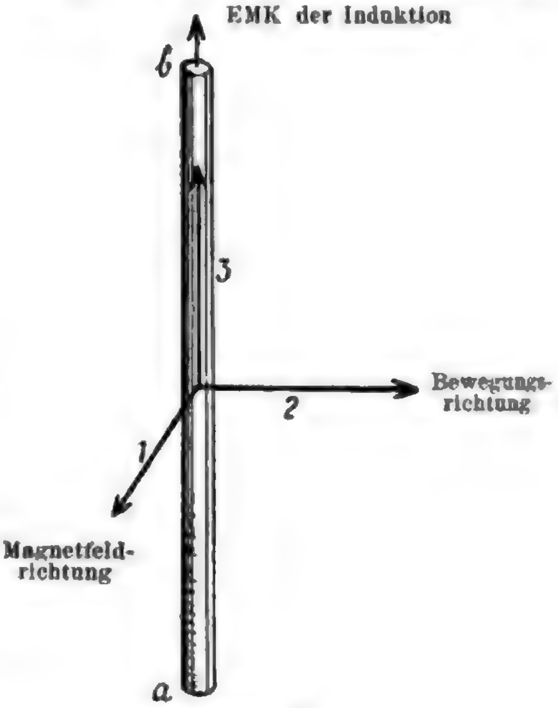


Fig. 17.

denkbar ist, so erkennt man den mit Figur 16 beschriebenen Versuch als Ausschnitt aus dem Falle, daß zwei Stromschleifen mit ihren Ebenen parallel und mit gleichgerichteter Strömung einander gegenüber gestellt sind. Sie suchen sich in ein und dieselbe Ebene zu bringen, d. h. sie ziehen sich an. Auseinanderziehen entgegen ihrer anziehenden Kraft muß stromschwächende, also Gegen-EMKK in den Stromschleifen zur Folge haben, Annäherung stromverstärkende. In beiden Kreisen muß das gleiche passieren, da die Bewegung relativ ist. Bei Einführung eines besonderen magnetischen Energieträgers, wie ihn die alte Physik brauchte und wie man ihn auch heute noch als Hilfsvorstellung benutzt, wird eine Stromschleife identisch mit einer magnetischen Doppelschicht, d. h. einer von der Stromschleife eingefaßten, sonst beliebig gelegten Fläche, die auf der einen Seite mit positivem, auf der anderen mit negativem Magnetismus belegt ist. Unsere beiden sich gegenüberstehenden Stromschleifen können dann als zwei, sich mit der Fläche der kleineren Schleife berührende Doppelschichten dargestellt werden, die an der beiden gemeinsamen Fläche zu einer einzigen Doppelschicht größerer Stärke zusammenfließen. Entfernen der Stromschleifen voneinander kann so als Zerreißen, Nähern als Aufbauen einer magnetischen

Digitized by Google

Doppelschicht angesehen werden. So entstehen hier die EMKK durch mechanisches Zerreißen oder Aufbauen von magnetischen Doppelschichten genau so, wie sie im früheren Falle durch mechanisches Zerreißen oder Aufbauen von elektrischen Doppelschichten zustande kamen.

Die EMK der Induktion ist es, die in den Dynamogeneratoren zur Erzeugung elektrischer Energie aus mechanischer, in den Elektromotoren als Verbraucherkraft zur Gewinnung mechanischer Energie aus elektrischer ausgenutzt wird. Diese Maschinen sind Anordnungen, die den in Figur 17 dargestellten Vorgang durch Rotation des einen Maschinenteils (des Ankers) gegen einen anderen (Feldmagnet) zu einem kontinuierlichen gestalten. Dynamomaschinen und Influenzmaschinen stehen, wie man rückschauend erkennt, in demselben Verhältnis, wie die Thermoelemente und die galvanischen Elemente.

Die EMK der Induktion findet auch sonst vielfache Anwendung zur Umformung von mechanischer Energie in elektrische und umgekehrt. Bei den Telegraphenapparaten z. B. ist es die durch die Bewegung des „Ankers" induzierte EMK, welche als Gegenkraft dem zur Zeichengebung entsandten Stromstoße die zum Anziehen des Ankers nötige Energie entnimmt. Ebenso ist es bei den elektrischen Hausklingeln und den polarisierten Telephonweckern. Beim Telephon wirkt die durch die Membranbewegung induzierte EMK entweder als Generatorkraft im Gebertelephon oder als Verbraucherkraft im Empfangstelephon, um die Schallenergie in elektrische oder die elektrische in Schallenergie zu verwandeln. Auch die Einstellung der elektromagnetischen Meßinstrumente erfolgt unter Ausnutzung der EMK der Induktion.

4d) **Elektromotorische Kräfte auf Rechnung von strahlender Aetherenergie.** Das Wesen dieser EMKK ist schon Abschnitt 2 erörtert worden: Ein elektromagnetischer Impuls ist, wie dort gezeigt, im Grunde nichts anderes, als eine durch den Aether fortwandernde EMK. Trifft der Impuls auf Elektronen, so setzt die mit ihm wandernde EMK sie in Bewegung; sie wirkt als Generatorkraft auf sie und wandelt die Aetherenergie des Impulses in kinetische Energie der Elektronen um. Trifft er auf Ionen, so geht die primär übertragene elektrische Energie sogleich in kinetische Energie des materiellen Trägers der elektrischen Ladung über, d. h. in Wärme. Das wird auch sekundär mit der auf die Elektronen übertragenen Energie der Fall sein, wenn diese, wie in den Metallen, alsbald mit Molekülen zusammenprallen müssen. Am wichtigsten ist der Fall, daß ein periodischer Impuls, also eine elektromagnetische Welle auf Elektronen stößt, z. B. beim Auftreffen auf eine Metallfläche. Dann werden die freien Elektronen an der Oberfläche von der Welle hin und her gerissen, nehmen ihr alle Energie ab und senden durch die eingeleitete Hin- und Herschwingung selber wieder eine Welle in den Raum zurück; die Metalloberfläche erscheint als Spiegel, der die elektromagnetische Welle zurückwirft, soweit nicht durch Zusammenstöße mit Molekülen Absorption erfolgt, d. h. Umwandlung in Wärmeenergie. Durch Nichtleiter, in denen keine freien Elektronen vorhanden sind, dringt die Welle, ohne Energie abzugeben, hindurch (vgl. übrigens die Artikel „Lichtbrechung" und „Lichtdispersion"); es sei denn, daß ihre Schwingungszahl von derselben Größenordnung wird, wie die der Schwingungen, welche die am Aufbau des Atoms beteiligten Elektronen oder die am Aufbau des Moleküls beteiligten Ionen um ihre Gleichgewichtsanordnung machen können. In diesem Falle wird die auftreffende Welle diese Schwingungen anregen und Energie an das Molekül abgeben; am meisten im Falle der Resonanz, d. h. bei Uebereinstimmung beider Schwingungszahlen (Absorptionsstreifen oder -linien im Spektrum). Es kann vorkommen, daß auf diese Weise so große Schwingungen im Molekül auftreten, daß es zertrümmert wird und eine andere chemische Anordnung gewinnt (photochemische Prozesse).

Auch beim Auftreffen auf Leiter kann das Resonanzphänomen eine große Rolle spielen und eine erheblich größere Energieabsorption bewirken wie sonst. Die auf einem Leiter befindlichen Elektronen besitzen nämlich, wie im Artikel „Elektrische Schwingungen" genauer ausgeführt wird, die Fähigkeit, elektrische Eigenschwingungen auszuführen. Stimmt die auftreffende Welle mit der Schwingungszahl einer solchen Eigenschwingung überein, so setzt sie die Elektronen des Leiters in lebhafte Resonanzschwingungen, wobei dann durch die Zusammenstöße mit den Molekülen die absorbierte Energie alsbald in Wärme verwandelt wird. Die Empfangsantennen der drahtlosen Telegraphie sind solche schwingungsfähigen Systeme, in welchen die durch die zugestrahlten EMKK erregten und durch Resonanz möglichst groß gemachten elektrischen Ströme zu einer beobachtbaren Arbeitsleistung gebracht werden.

Daß zum Vorwärtsschieben eines elektromagnetischen Impulses eine von dem Impulse rückwärts ausgeübte GegenEMK überwunden werden muß, ist ebenfalls schon Abschnitt 2 auseinandergesetzt worden. Man kann das dort Entwickelte kurz so ausdrücken: Vor seiner

Digitized by Google

Front betätigt ein fortschreitender elektromagnetischer Impuls eine Generator-EMK, **hinter** seiner Front eine Verbraucher-EMK. Mit Hilfe der letzteren entnimmt er dem hinter der Front liegenden Energieträger Energie, mit Hilfe der ersteren überträgt er dieselbe auf den vor ihr liegenden Energieträger. So wie er mit Hilfe der ersteren Energie auf vor ihm liegende Elektronen oder Ionen übertragen kann, so entnimmt er mit Hilfe der letzteren seine Energie solchen Elektronen oder Ionen, die eine Aenderung ihrer Beschleunigung erfahren. Bringt man durch irgendeinen Prozeß die Elektronen im Atom oder die Ionen im Molekül zum Schwingen um ihre Gleichgewichtsanordnung, so geht also eine Lichtstrahlung von ihnen aus, und das Spektrum dieser Strahlung zeigt, daß in der Tat charakteristische Eigenschwingungen auftreten (Näheres s. im Artikel „Spektroskopie“). Beschleunigt man die Elektronen eines Leitersystems, so entstehen seine elektrischen Eigenschwingungen und das System strahlt entsprechende elektrische Schwingungen in den Aether hinaus. Die Sendeapparaturen der drahtlosen Telegraphie mit ihren Antennen sind solche Leitersysteme, in denen durch Erregung der Eigenschwingung die Gegen-EMK der Aetherstrahlung in besonders wirksamer Weise überwunden und eine möglichst kräftige Ausstrahlung von elektromagnetischen Wellen längs der Erdoberfläche erreicht wird (Näheres s. im Artikel „Elektrische Schwingungen“).

5. **Gleich- und wechselelektromotorische Kräfte.** Die auf Rechnung von Wärmeenergie und chemischer Energie tätigen elektromotorischen Kräfte wirken ihrem Wesen nach stets in dem gleichen Sinne, sie sind gleichelektromotorische Kräfte. Im Gegensatz dazu sind die auf Rechnung von mechanischer und von strahlender Aetherenergie tätigen EMKK ihrem Wesen nach Wechsel-EMKK. Denn es muß im ersten Falle stets zwischen einem Auseinanderreißen und einem Wiederzusammenführen der elektrischen und magnetischen Doppelschichten abgewechselt werden; im zweiten Falle kann die Aenderung des Aetherzwanges, welche die EMK bedingt, auch nicht unbegrenzt in dem einen oder anderen Sinne erfolgen; es muß zwischen zunehmender und abnehmender Beschleunigung der Elektronen abgewechselt werden. Man kann indessen jede Gleich-EMK durch periodisch arbeitende Kommutatoren als Wechsel-EMK arbeiten lassen. Die Periode der entstehenden Wechsel-EMK ist dann durch die Periode der Kommutation bestimmt. Ebenso kann man Wechsel-EMKK mit Hilfe solcher Kommutatoren als Gleich-EMKK arbeiten lassen, nur muß alsdann gesorgt sein, daß die Kommutation mit derselben Periode erfolgt, die die Wechsel-EMK besitzt, daß sie synchron mit ihr ist.

Ein Beispiel für eine Umwandlung einer Gleich-EMK in eine Wechsel-EMK ist das Mikrophon (vgl. den Artikel „Telephonie“). Es vollzieht die Kommutation einer Gleich-EMK in eine Wechsel-EMK, deren Kurvenform der Kurvenform der Schallschwingungen entspricht, welche die Mikrophonmembran macht. Entsprechend diesen Schallschwingungen schwankt der Widerstand des Mikrophons auf und ab, und die kommutierende Kraft des Mikrophons liegt eben in diesen Widerstandsschwankungen. Ein weiteres interessantes Beispiel von Umwandlung einer Gleich-EMK in eine Wechsel-EMK findet sich beim selbsttönenden Lichtbogen von Duddell (vgl. den Artikel „Lichtbogenentladung“). Ein Beispiel für die Umwandlung von Wechsel-EMK in Gleich-EMK bietet der Kommutator der Gleichstromdynamomaschinen. Für den erforderlichen Synchronismus der Kommutation und der Wechsel-EMK ist hierbei dadurch gesorgt, daß der Kommutator auf der Welle der Dynamomaschine angebracht ist und synchron mit dem Anker rotiert (vgl. den Artikel „Dynamomaschinen“).

Wirkt eine Gleich-EMK in einem Leiterkreise, so treibt sie die Elektrizität dauernd in demselben Sinn durch ihn hindurch, sie erzeugt einen Gleichstrom, welcher die von der EMK erteilte Energie mit sich fortführt. Wirkt eine Wechsel-EMK, so treibt sie die Elektrizität mit der Periode ihres Wechsels hin und her, sie erzeugt einen Wechselstrom, der ebenfalls imstande ist, Energie zu transportieren (vgl. den Artikel „Wechselstrom“). Um einem Gleichstrome seine Energie zu entziehen, muß ihm in der Verbrauchermaschine eine Gleich-EMK als Gegenkraft in den Weg gestellt werden, wie z. B. in einem Gleichstromelektromotor. Um einem Wechselstrome seine Energie zu entziehen, muß ihm eine Wechsel-EMK in den Weg gestellt werden, die folgende Bedingungen erfüllen muß: a) sie muß synchron mit dem pendelnden Wechselstrome wechseln; b) sie muß stets Gegen-EMK sein, also in solcher „Phase“ wechseln, daß sie positive Richtung hat, wenn der Strom negative, und umgekehrt. Einige von den EMKK, die wir kennen gelernt haben, erfüllen ganz automatisch diese Bedingungen, z. B. die Gegen-EMK, welche ein Wechselstrom durch den Widerstand eines Leiters erfährt. Sie ist ja durch $-iw$ bestimmt, wechselt also mit i ihr Vorzeichen. Daher ist die Wärme-

Digitized by Google

entwickelung eines Stromes in einem Leiter von der Richtung des Stromes unabhängig und geschieht ebenso durch Wechselstrom, wie durch Gleichstrom. Auch die Gegen-EMK, welche beim Ausstrahlen von elektromagnetischen Wellen in dem strahlenden Leiter tätig ist (vgl. den vorigen Abschnitt), ist von dieser Art. Man kann sie deshalb wieder durch eine Beziehung $-iw_s$ ausdrücken und nennt dann w_s den „Strahlungswiderstand" des Leiters. Bei anderen EMKK müssen die Bedingungen a und b erst künstlich erfüllt werden, z. B. bei den Wechselstromsynchronmotoren, die aber den einmal hergestellten, den Bedingungen a und b entsprechenden Zustand automatisch festhalten (vgl. den Artikel „Dynamomaschinen"). Bei EMKK, die ihrer Natur nach Gleich-EMKK sind, müssen durch synchrone Kommutation die Bedingungen a und b sichergestellt werden. Ein Beispiel hierfür bietet das Laden einer Akkumulatorenbatterie mit Wechselstrom unter Vermittlung eines synchronen Kommutators. Es gibt derartige Apparate, in denen der Wechselstrom selbst automatisch die synchrone Kommutation bewirkt (vgl. Quecksilbergleichrichter im Artikel „Elektrische Ventile").

6. Reversible und irreversible elektromotorische Kräfte. An den EMKK lassen sich im Sinne ihrer im vorigen Abschnitt behandelten Arbeitsbeziehung zu einem Wechselstrom folgende Typen unterscheiden:

6a) Der Typ einer EMK, die auf ein Elektron gemäß seiner Lage im Raume wirkt. Dieser Typ wird also durch die Raumkoordinaten x y z des Elektrons bestimmt. Hierher gehört die durch die sogenannte Kapazität zum Ausdruck kommende EMK, die das elektrische Feld eines elektrischen Systems bei einer Lagenänderung eines Elektrons betätigt, z. B. ein geladener Kondensator (vgl. 2b, α). Ferner gehören hierher die elektrischen Doppelschichten chemischen oder thermischen Ursprungs, die den galvanischen Elementen und Thermoelementen zugrunde liegen (vgl. 4a, δ; 4b). Hierher gehört auch die beim Zerreißen und Bilden elektrischer und magnetischer Doppelschichten in Tätigkeit tretende EMK (vgl. 4c, α u. β).

6b) Der Typ einer EMK, die auf ein Elektron gemäß seiner Geschwindigkeit wirkt. Dieser Typ hängt also von den Geschwindigkeitskomponenten $\frac{dx}{dt}\ \frac{dy}{dt}\ \frac{dz}{dt}$ des Elektrons ab. Hierher gehört die Verbraucher-EMK des Leitungswiderstandes (vgl. 4a, α). Auch die Generator-EMK, die ein Leiter mit fallender Charakteristik, z. B. ein Gleichstromlichtbogen beim Durchgange eines Wechselstromes entwickelt (vgl. den Artikel „Lichtbogenentladung").

6c) Der Typ einer EMK, die auf ein Elektron gemäß seiner Beschleunigung wirkt. Dieser Typ hängt von den Beschleunigungskomponenten $\frac{d^2x}{dt^2}\ \frac{d^2y}{dt^2}\ \frac{d^2z}{dt^2}$ des Elektrons ab. Hierher gehört die durch die sogenannte Selbstinduktion zum Ausdruck kommende EMK, die das Magnetfeld eines Stromkreises bei einer Geschwindigkeitsänderung eines Elektrons betätigt (vgl. 2b, β).

6d) Der Typ einer EMK, die auf ein Elektron gemäß der Aenderung seiner Beschleunigung wirkt. Dieser Typ hängt von den Komponenten $\frac{d^3x}{dt^3}\ \frac{d^3y}{dt^3}\ \frac{d^3z}{dt^3}$ des Elektrons ab. Hierher gehört die Verbraucher-EMK, welche durch die Reaktion eines elektromagnetischen Strahlungsimpulses auf das strahlende Elektron ausgeübt wird (vgl. 4d).

Wird ein zu einem Wechselstrome gehöriges Elektron solchen EMKK ausgesetzt, so ergibt sich ein prinzipiell verschiedenes Verhalten, je nachdem die Type b und d oder die Type a und c in Frage kommen. Die Type a und c können an einem vom Wechselstrome hin und her gezerrten Elektron keine dauernde Arbeit leisten; was ihm auf dem Hinwege an Arbeit mitgeteilt wird, gibt es auf dem Rückwege wieder ab. Denn im Falle a kommt es durch den Rückweg wieder in die gleiche Lage; im Falle c erfährt es auf dem Rückweg eine Verzögerung, welche die Beschleunigung auf dem Hinwege wieder aufhebt; die Arbeitsbilanz eines Hin- und Herganges, einer Periode, ist Null. Die Type b und d dagegen setzen beim Hingang des Elektrons Arbeit von demselben Vorzeichen um wie beim Rückgang, so daß hier die Arbeitsbilanz einer Periode einen endlichen positiven oder negativen Betrag ergibt. Mit diesen Typen wird also eine dauernde Energieumsetzung durch Wechselstrom ermöglicht. Wir nennen die EMKK der beiden Type a und c umkehrbare (reversible), die der Type b und d nichtumkehrbare oder irreversible. Damit soll bezeichnet werden, daß die Arbeitsumsetzungen, welche die einen leisten, sogenannte reversible Arbeitsprozesse sind, die, welche die anderen leisten, irreversible. Einen reversiblen Arbeitsprozeß hat ein Energieträger dann erfahren, wenn er so in die Anfangsbedingungen des Prozesses zurückversetzt werden kann, daß keine Spur des stattgefundenen Vorganges in der Welt zurückbleibt. Einen Energieträger in die Anfangsbedingungen des Prozesses zurückversetzen heißt ihn in die alte Zeit und an den alten,

Digitized by Google

Ort zurückbringen. Dazu ist aber, mathematisch gesprochen, das Vorzeichen der Bewegung des Energieträgers und das Vorzeichen der Zeit umzukehren. Wenn nun die auf den Energieträger wirkende Kraft in Raum und Zeit so bestimmt ist, daß sie ihr Vorzeichen beibehält, wenn das Vorzeichen der Bewegung und der Zeit umgekehrt wird, so ist sie eine reversible; denn sie geht bei dieser Umkehr aus einer Verbraucherkraft in eine Generatorkraft über, und umgekehrt. Kehrt sie dagegen dabei das Vorzeichen um, so ist sie eine irreversible, denn sie bleibt dann Verbraucherkraft, wenn sie es vorher war, und Generatorkraft, wenn sie es vorher war. Eine Vorzeichenumkehr muß bei allen Kräften auftreten, die durch eine ungeradzahlige Zeitableitung der Raumkoordinaten des Energieträgers $\left(\text{z. B. } \frac{dx}{dt}, \frac{d^3x}{dt^3}\right)$ bestimmt sind, da bei ihnen Zähler und Nenner gleichzeitig ihr Vorzeichen umkehren. Darum sind z. B. unsere Type b und d irreversible EMKK. Bei allen Kräften dagegen, die durch eine geradzahlige Zeitableitung der Raumkoordinaten des Energieträgers $\left(\text{z. B. } \frac{d^2x}{dt^2}\right)$ bestimmt sind, wird das Vorzeichen bei der Umkehr des Prozesses nicht geändert. Sie sind daher reversible Kräfte, z. B. Typ c unserer EMKK, sowie auch Typ a, da seine Unabhängigkeit von der Zeit als nullte, also geradzahlige Zeitableitung gerechnet werden kann.

Literatur. **G. Mie,** *Lehrbuch der Elektrizität und des Magnetismus. Stuttgart 1910.* — **H. Barkhausen,** *Das Problem der Schwingungserzeugung. Leipzig 1907.* — **M. Planck,** *Die Einheit des physikalischen Weltbildes. Leipzig 1909.*

H. Th. Simon.

Elektronen.

1. Begriff des Elektrons. 2. Die Abspaltung von Elektronen aus den Atomen. 3. Es gibt nur eine Art von Elektronen. 4. Die Elektrizitätsleitung in Metallen. 5. Die Lichtemission der Atome. 6. Die Abhängigkeit der trägen Masse von der Geschwindigkeit. 7. Das Wesen der Elektronen und der Materie überhaupt.

1. Begriff des Elektrons. Es ist eine bekannte Tatsache, daß die materiellen Partikelchen, die von der modernen Naturforschung „Atome" genannt werden, keineswegs das sind, was man in der Philosophie als Atome bezeichnen würde, nämlich letzte, einfache und unteilbare Elementarteilchen der Materie. Die physikalischen Atome sind zusammengesetzt und haben eine komplizierte innere Struktur, was sich beispielsweise daran zeigt, daß sie eigentümliche Schwingungen ausführen können und dadurch Licht emittieren. Da das Licht aus elektromagnetischen Wellen besteht, so läßt sich von vornherein schon sagen, daß die beweglichen Teile, die im Innern des Atomes die Schwingungen ausführen, elektrisch geladen sein müssen.

In neuerer Zeit ist es nun in der Tat gelungen, aus den Atomen kleine Partikelchen abzuspalten, die mit dem Restatom nur ziemlich locker verbunden zu sein scheinen, und die nach allem, was wir bisher von ihnen wissen, einheitliche unteilbare Elementarteilchen, also „Atome" im philosophischen Sinn des Wortes sind. Außerdem ist ihr Wesen dadurch charakterisiert, daß sie in unveränderlicher Weise durch eine elektrische Ladung mit dem Weltäther verkettet sind. Wegen dieser Wesenseigentümlichkeit nennt man sie Elektronen. Wir können demnach definieren:

Elektronen sind einfache unteilbare materielle Elementarpartikelchen, die in den Atomen als nie fehlende Bestandteile leicht beweglich vorhanden sind, sich durch geeignete Mittel von den Atomen abspalten lassen, und die eine unveränderliche elektrische Ladung haben.

2. Die Abspaltung von Elektronen aus Atomen. Bei den folgenden Vorgängen treten Elektronen aus den Atomen aus: 1. bei der Glimmentladung, 2. bei Weißglut, 3. bei chemischen Prozessen, 4. beim Auftreffen von Licht oder von Röntgenstrahlen auf absorbierende Körper, 5. bei den radioaktiven Prozessen.

Zuerst hat man das Auftreten von Elektronen, die aus den Atomen isoliert sind, bei Glimmentladungen wahrgenommen. Glimmentladungen bekommt man am schönsten und reinsten in Gasen von sehr niedrigem Druck. In einer weiten Glasröhre, die mit einem sehr verdünnten Gas gefüllt ist und an ihren beiden zugeschmolzenen Enden je eine Metallelektrode hat, einer sogenannten Geißlerschen Röhre, sehen wir, wenn eine Entladung hindurchgeht, zunächst zwei leuchtende Abschnitte: Die negative Elektrode, die Kathode, ist rings von einem bläulichen Lichtnebel, dem negativen Glimmlicht, umgeben; von der positiven Elektrode, der Anode, aus erstreckt sich nach der Kathode hin ein langes Lichtband, die positive Lichtsäule. Zwischen diesen beiden Lichtbereichen ist ein breiter, dunkler Zwischenraum, der äußere oder Faradaysche Dunkelraum. Wenn man den Abstand der beiden Elektroden bei sonst gleich bleibenden Verhält-

Digitized by Google

nissen mehr und mehr verkleinert, so verkürzt sich die positive Lichtsäule, während das negative Glimmlicht unverändert bleibt. Man kann sehr leicht eine Entladung bekommen, die bei fehlender positiver Lichtsäule nur das Kathodenglimmlicht zeigt, wenn man mit der Anode bis in den äußeren Dunkelraum oder bis in das Glimmlicht hinein vorrückt. Es kann also eine Glimmentladung geben, die nur aus den Vorgängen besteht, die das negative Glimmlicht anzeigt, und es gibt keine Glimmentladung ohne sie, diese Vorgänge sind das Wesentliche an ihr.

Genauere Untersuchungen des negativen Glimmlichtes, die zuerst von Hittorf ausgeführt worden sind, haben gezeigt, daß es hervorgerufen wird durch eine eigentümliche Strahlung, die die Kathode aussendet und die man deswegen Kathodenstrahlung nennt. Das Gas in der Geißlerschen Röhre absorbiert diese Strahlung, und die Absorption ist mit einer Lichterregung verbunden. Daß es sich in der Tat so verhält, läßt sich z. B. erkennen, wenn man dicht vor der Kathode irgendeinen festen Gegenstand anbringt. Dieser wirft dann einen deutlichen, scharf begrenzten Schatten, in welchem das Gas nicht zum Leuchten erregt wird. Das wäre nicht möglich, wenn nicht die das Leuchten erregende Wirkung strahlenartig von der Kathode ausginge. Die Kathodenstrahlen bringen, nebenbei bemerkt, das Gas nicht allein zum Leuchten, sondern, wie durch zahlreiche Untersuchungen bewiesen ist, ionisieren sie es auch, sie machen es also zu einem elektrischen Leiter, durch den der Entladungsstrom gehen kann, sie sind deswegen sozusagen der Ursprung der Glimmentladung. Wenn man das Gas aus der Röhre weiter auspumpt, so werden die Kathodenstrahlen in dem dünneren Gas weniger absorbiert, das Glimmlicht wird schwächer. Wenn das Gas so dünn ist, daß Kathodenstrahlen bis an die Glaswandung der Röhre kommen, so bemerkt man, daß das von ihnen getroffene Glas grünlich leuchtet, fluoresziert. Es gelingt mit einer guten modernen Luftpumpe leicht, die Verdünnung des Gases so weit zu treiben, daß die Absorption der Kathodenstrahlen in dem Gas äußerst gering ist. Man sieht dann das von ihnen getroffene Glas der Rohrwandung sehr hell leuchten, während das Glimmlicht im Gase ganz schwach ist. Schließt man den Querschnitt des Rohres vor der Kathode mit einer Scheibe, die eine kleine Oeffnung hat, so tritt durch die Oeffnung nur ein schmales Bündel von Kathodenstrahlen, das man an dem kleinen Lichtfleck erkennen kann, der auf dem Glase dort erscheint, wo das Kathodenstrahlenbündel auftrifft. Mit einem derartigen dünnen Kathodenstrahlenbündel kann man nun eine Reihe von Experimenten anstellen, die über die Natur der Kathodenstrahlen vollständig Aufschluß geben. Bringt man einen Magneten in die Nähe des Kathodenstrahlenbündels, so verschiebt sich der leuchtende Fleck auf der Glaswand. Die Kathodenstrahlen biegen sich also im magnetischen Feld von ihrer ursprünglichen Richtung ab, für die Größe und Richtung der Ablenkung hat man sehr einfache quantitative Gesetzmäßigkeiten experimentell feststellen können. Auch in einem elektrischen Feld werden die Kathodenstrahlen abgelenkt, nach anderen Gesetzen, wie im magnetischen Feld, nach Gesetzen, die ebenfalls quantitativ experimentell ermittelt sind. Diese Ablenkungsgesetze stimmen genau mit denen überein, die ein Strom von negativ geladenen Teilchen, der in der Richtung des Kathodenstrahlenbündels mit großer Geschwindigkeit dahinschießt, nach den Gesetzen des Elektromagnetismus zeigen müßte. In der Tat läßt sich auch leicht nachweisen, daß ein Kathodenstrahlenbündel einem Körper, auf den es auftrifft, andauernd eine negative Ladung zuführt, und daß diese Aufladung sofort unterbleibt, wenn man die Kathodenstrahlen etwa mit Hilfe eines Magneten von dem Körper weglenkt, ohne sonst etwas an der Glimmentladung zu ändern.

Durch quantitative Untersuchungen ist festgestellt worden, daß sich verschiedene Kathodenstrahlen nur durch die Schnelligkeit, mit der die negativ geladenen Teilchen in ihnen dahinfliegen, unterscheiden, daß aber diese Teilchen selber stets die gleichen sind, aus welchem Metall auch die Kathode besteht, die sie ausschleudert, und mit was für einem Gas auch die Entladungsröhre gefüllt ist. Die Kathodenstrahlenteilchen sind also Partikelchen, die sich aus allen Stoffen loslösen können, sie müssen demnach Bestandteile von allen chemischen Atomen sein.

Durch Messung der magnetischen und der elektrischen Ablenkung an einem und demselben Kathodenstrahl kann man das Verhältnis aus der elektrischen Ladung zu der trägen Masse eines Teilchens finden. Die ablenkende Kraft ist nämlich im elektrischen Feld das Produkt aus der Feldstärke mal der Ladung des Teilchens, im magnetischen Feld das Produkt aus der Feldstärke mal der Ladung und der Geschwindigkeit des Teilchens. Der Ablenkungskraft hält die Zentrifugalkraft des fliegenden Teilchens, dessen Bahn durch die ablenkende Kraft gekrümmt wird, das Gleichgewicht und diese ist gleich dem Produkt der trägen Masse mit dem Quadrat der Geschwindigkeit dividiert durch den Krümmungsradius der Bahn. Mißt man nun die Stärke des ablenken-

Digitized by Google

den elektrischen Feldes, ebenso die des ablenkenden magnetischen Feldes, ferner die Ablenkungen des Kathodenstrahls aus seiner geraden Bahn in den beiden Experimenten, woraus sich beidemal der Krümmungsradius der Bahn während der Ablenkung berechnen läßt, so stehen in den beiden Gleichungen „Ablenkende Kraft gleich Zentrifugalkraft" als Unbekannte nur noch die Ladung des Teilchens, seine Geschwindigkeit und seine träge Masse. Eliminiert man aus den beiden Gleichungen die Geschwindigkeit, so bekommt man eine einzige Gleichung, die die beiden anderen Unbekannten enthält, und zwar nur in Form des Quotienten „Ladung dividiert durch träge Masse": $\frac{e}{m}$, den man somit quantitativ ermitteln kann. Es sind nun zahlreiche Messungen angestellt worden, die im allgemeinen gut übereinstimmende Werte für e/m gegeben haben, ein deutlicher Beweis für die einheitliche Natur aller Kathodenstrahlpartikelchen. Es hat sich ergeben:

$$\frac{e}{m} = 1{,}75.10^{8}\,\frac{\text{Coulomb}}{\text{Gramm}}.$$

Bedenken wir nun weiter, daß es nach den Gesetzen der Elektrolyse nur elektrische Ladungen gibt, die ganzzahlige Multipla eines bestimmten Elementarquantums der elektrischen Ladung sind, eines Quantums, das sich durch neuere Messungen zu $1{,}56.10^{-19}$ Coulomb ergeben hat (vgl. Bd. VI, S. 768). Es darf aus Gründen, die hier nicht erörtert werden können, als sicher gelten, daß die kleinen elektrisch geladenen Teilchen in den Kathodenstrahlen die Ladung von 1 Elementarquantum haben, ihre träge Masse beträgt demnach: $0{,}891\ 10^{-27}$ g. Diese träge Masse ist außerordentlich viel kleiner als die eines Wasserstoffatoms, des kleinsten der chemischen Atome. Denn aus den Gesetzen der Elektrolyse ist bekannt, daß das Verhältnis eines Elementarquantums zur Masse eines Wasserstoffatoms den Wert hat:

$$\frac{e}{M} = \frac{96540\ \text{Coulomb}}{1{,}008\ \text{Gramm}} = 0{,}9577.10^{5}\,\frac{\text{Coulomb}}{\text{Gramm}}.$$

Man sieht hieraus, daß das Verhältnis der trägen Masse eines Kathodenstrahlpartikelchens zu der eines Wasserstoffatoms beträgt:

$$\frac{m}{M} = \frac{0{,}9577.10^{5}}{1{,}75.10^{8}} = 0{,}000547 = \frac{1}{1830}.$$

Die Partikelchen, die die Kathodenstrahlen bilden, sind außerordentlich klein im Vergleich zu den chemischen Atomen, sie kommen als abtrennbare Bestandteile in allen chemischen Atomen vor und zeigen überall dieselbe Beschaffenheit, sie führen stets eine elektrische Ladung von negativem Vorzeichen und von der Größe 1 Elementarquantum.

Die Kathodenstrahlpartikelchen sind also Elektronen.

Die Glimmentladung ist aber keineswegs der einzige Vorgang, bei welchem Elektronen aus den Atomen abgespalten werden. In der Nähe **weißglühender Körper** wird die Luft elektrisch leitend. Eine genauere Untersuchung hat ergeben, daß dies davon herrührt, daß weißglühende Körper an die Luft positiv und negativ geladene Teilchen — Ionen — abgeben. In einem sehr verdünnten Gas liefern sie meistens nur negativ geladene Teilchen und diese erweisen sich als vollkommen identisch mit den Partikelchen, aus denen die Kathodenstrahlen bestehen, es sind ganz dieselben negativ geladenen Elektronen, von denen soeben schon die Rede war. Am besten kann man das Austreten dieser Elektronen bei Gluthitze beobachten, wenn man, nach **Wehnelt**, auf einem dünnen Platinblechstreifen einen Fleck von Calciumoxyd macht und den Blechstreifen durch einen hindurchgeleiteten elektrischen Strom zur Glut erhitzt. Befindet sich der Blechstreifen in einem evakuierten Raum, so sendet der Oxydfleck bei Gluthitze eine große Menge von Elektronen aus, denen man beliebige Geschwindigkeiten erteilen kann, wenn man den glühenden Blechstreifen auf mehr oder weniger hohe negative Potentiale auflädt. Nimmt man ein niedriges Potential, so erfahren die Elektronen nur eine kleine abstoßende Kraft und es gehen von dem Oxydfleck sehr langsame Kathodenstrahlen aus, es gelingt leicht, sie auf diese Weise so langsam zu bekommen, wie sie bei Glimmentladungen niemals auftreten können. Andererseits kann man im äußerst hohen Vakuum, wo überhaupt keine Glimmentladung mehr zustande zu bringen ist, durch Anlegen sehr hoher negativer Potentiale an die glühende **Wehneltkathode** Elektronenstrahlen von viel größeren Geschwindigkeiten hervorbringen, als sie bei Glimmentladungen vorkommen. Diese Möglichkeit, den Geschwindigkeitsbereich der Elektronenstrahlen beliebig weit nach beiden Seiten hin auszudehnen, macht die Wehneltkathode zu einem wichtigen Hilfsapparat bei vielen Messungen. Jedenfalls haben alle Messungen erwiesen, daß die von dem glühenden Oxydfleck ausgehenden Elektronen genau dieselben sind wie die von der Kathode in einer Glimmentladung.

Auf der elektronenlösenden Wirkung der Gluthitze beruht übrigens die zweite Art elektrischer Entladung in Gasen, die es noch außer der Glimmentladung gibt, nämlich die Lichtbogenentladung. Diese Ent-

Digitized by Google

ladungsform ist dadurch charakterisiert, daß bei ihr die Kathode an der Stelle, wo die Strombahn im Gase, der Lichtbogen, ansetzt, durch elektrisch zugeführte Energie in Glut kommt. Die glühende Stelle der Kathode sendet reichlich Elektronen aus, und diese ionisieren das Gas so stark, daß es ein vorzüglicher Leiter wird, durch den außerordentlich starke Ströme bei ziemlich geringer Spannung hindurchgehen. In der Glimmentladung, d. h. der Entladung mit kalter Elektrode, muß an Stelle der Glut ein anderes Agens wirksam sein, das aus der Kathode die Elektronen frei macht, wir werden dies Agens, die sogenannten Kanalstrahlen, im folgenden auch noch zu erwähnen haben.

Die dritte Gruppe von Vorgängen, bei denen Elektronen frei werden, sind die chemischen Prozesse. Es ist schon fast so lange, als man überhaupt mit Elektrizität experimentiert, bekannt, daß Flammen leitend sind, und man kann nach allem, was von der Leitfähigkeit der Flammen bekannt ist, mit ziemlicher Bestimmtheit sagen, daß diese Leitfähigkeit dadurch zustande kommt, daß sich von den miteinander reagierenden Atomen Elektronen ablösen. Entscheidendere Versuche haben kürzlich Fr. Haber und G. Just angestellt (über die Aussendung von Elektronenstrahlen bei chemischen Reaktionen, Ann. d. Physik, Bd. 36, S. 308, 1911). Wenn sie eine ganz frische Oberfläche der flüssigen Legierung Kalium-Natrium mit Gasen in Berührung brachten, die mit der Legierung chemisch reagierten, wie Sauerstoff, Phosgen, Brom, so lösten sich von ihr negativ geladene Partikelchen ab, während bei Berührung mit indifferenten Gasen, wie Wasserstoff oder Stickstoff, nichts derartiges eintrat. Bei genauerer Untersuchung erwiesen sich die negativen Teilchen, die bei chemischen Reaktionen aus dem Metall austraten, als identisch mit den schon anderweit bekannten Elektronen.

Viertens ist der von H. Hertz entdeckte und besonders von Hallwachs genauer untersuchte lichtelektrische Effekt zu nennen. Läßt man Lichtstrahlen, am besten violette und ultraviolette Strahlen, auf einen absorbierenden Körper, beispielsweise eine Metallplatte, auftreffen, so lösen sich von ihm negativ geladene Teilchen ab. Diese Teilchen sind, wie zuerst Lenard nachgewiesen hat, vollkommen identisch mit den als Kathodenstrahlpartikelchen auftretenden Elektronen. Aehnlich wie die Lichtstrahlen wirken auch Röntgenstrahlen, die einen Körper treffen.

Fünftens endlich fliegen bei den radioaktiven Zerfallserscheinungen geladene Teilchen mit kolossalen Geschwindigkeiten aus den zerfallenden Atomen heraus und bilden so korpuskulare Strahlungen, ähnlich der von uns schon erwähnten Kathodenstrahlung. Man unterscheidet zwei total verschiedene Arten von korpuskularer Strahlung, die die radioaktiven Körper aussenden, nämlich die α-Strahlung und die β-Strahlung. Die α-Strahlung besteht aus positiv geladenen Teilchen, und zwar sind diese Teilchen Heliumatome, deren jedes mit zwei positiven Elementarquanten geladen ist. Die β-Strahlung besteht dagegen aus negativen Partikelchen, und zwar haben sich diese als vollkommen identisch mit den schon bekannten Elektronen erwiesen. Die β-Strahlen unterscheiden sich allerdings in einer Hinsicht von den Kathodenstrahlen, ihre Partikelchen haben eine noch sehr viel größere Geschwindigkeit als die Kathodenstrahlpartikelchen. Die Geschwindigkeit der β-Strahl-Teilchen liegt oft gar nicht mehr viel unterhalb der Lichtgeschwindigkeit 300000 km/sec, die, wie wir noch sehen werden, die oberste Grenze der überhaupt möglichen Geschwindigkeiten materieller Körper ist. Die großen Geschwindigkeiten der β-Strahl-Teilchen haben für den weiteren Fortschritt unserer wissenschaftlichen Erkenntnis sehr große Wichtigkeit erlangt, da es sonst noch niemals möglich gewesen ist, Körper zu beobachten, die sich fast mit Lichtgeschwindigkeit fortbewegen.

3. Es gibt nur eine Art von Elektronen. In allen Fällen, die soeben besprochen worden sind, haben die auftretenden Elektronen stets genau dieselbe Beschaffenheit. Man hat sich öfters die Frage gestellt, ob es nicht zum mindesten zwei Arten von Elektronen geben müsse, nämlich positiv geladene und negativ geladene, es ist indessen niemals gelungen, Elektronen mit positiver Ladung zu finden. Bei der Glimmentladung ist es stets die Kathode, an der die eigentümliche Elektronenstrahlung auftritt, die als der Ursprung der ganzen Entladungserscheinung aufzufassen ist. Es tritt allerdings an der Kathode auch noch eine zweite Strahlenart auf, die aus schnell fliegenden positiv geladenen Partikelchen besteht und die der Beobachtung nur deswegen meistens entgeht, weil sie den Kathodenstrahlen entgegengesetzt, also nach der Kathode hin gerichtet ist. Ordnet man hinter der Kathode noch einen evakuierten Raum an, der von dem Entladungsraum getrennt ist und nur durch eine enge Bohrung in der Kathode mit ihm kommuniziert, so beobachtet man, daß von dem Entladungsraum her durch die Bohrung hindurch in den Hilfsraum ein strahlenartiges Gebilde tritt, das ähnlich wie die Kathodenstrahlen an der Luminiszenz des von ihm getroffenen Gases zu erkennen ist. Diese Strahlung wurde von Goldstein entdeckt und von ihm wegen

Digitized by Google

der Eigentümlichkeit, daß sie die Kathode durch einen „Kanal" passiert, als Kanalstrahlung bezeichnet. Später hat W. Wien durch Versuche, die den mit Kathodenstrahlen angestellten Versuchen ganz analog sind, nachgewiesen, daß die Kanalstrahlen von schnell fliegenden positiv geladenen Teilchen gebildet werden. Indem W. Wien auch an den Kanalstrahlen die Größe e/m bestimmte, konnte er ferner nachweisen, daß die Kanalstrahlteilchen nicht etwa Elektronen sind, sondern einfach die positiv geladenen Atome des Gases, in welchem die Entladung vor sich geht. Wie wir gesehen haben, entstehen in dem vom negativen Glimmlicht erfüllten Raum durch die Wirkung der Kathodenstrahlen Gasionen. Die positiven Ionen werden nun durch das elektrische Feld mit großer Geschwindigkeit zur Kathode hingetrieben, stürzen eventuell, wenn diese ein Loch hat, hindurch und bilden so den Kanalstrahl. Die Kanalstrahlen werden von dem Gasinhalt der Röhre noch stärker absorbiert als die Kathodenstrahlen, sie erregen dabei im Gase ein Glimmlicht, das anders gefärbt ist als das Kathodenstrahlenglimmlicht, und zugleich ionisieren sie das Gas. Treffen Kanalstrahlen auf eine Metallfläche auf, so lösen sie von ihr Elektronen ab. Demnach sind bei der Glimmlichtentladung die Kanalstrahlen, die mit großer Wucht auf die Kathode auftreffen, das Agens, das die für die Kathodenstrahlen notwendigen Elektronen aus der Kathode frei macht. Da umgekehrt die für die Entstehung der Kanalstrahlen notwendigen Ionen erst von den Kathodenstrahlen im Gase hervorgebracht werden, so sind Kathodenstrahlen und Kanalstrahlen zwei Vorgänge, die sich andauernd gegenseitig in Gang halten, von denen der eine nicht ohne den anderen sein kann.

Eine wichtige Entdeckung hat J. Stark bei der spektroskopischen Untersuchung des Kanalstrahlenglimmlichts gemacht. Läßt man das Licht in der Richtung des Kanalstrahls in das Spektroskop eintreten, so sieht man außer den gewöhnlichen Spektrallinien, die dem Gas eigentümlich sind, auch noch verschobene Spektrallinien, die einem Licht von ein wenig kürzerer Schwingungsdauer entsprechen. Nach dem sogenannten Dopplerschen Prinzip haben nun Wellen, die ein schnell vorwärtsfliegender Körper ausstrahlt, in der Richtung, nach der sich der Körper hinbewegt, eine etwas kürzere Schwingungsdauer, in der entgegengesetzten Richtung eine etwas längere Schwingungsdauer, wie die Eigenschwingung des Körpers. Die Aenderung der Schwingungsdauer wächst mit der Geschwindigkeit des Körpers und läßt sich leicht aus ihr berechnen. Man muß hieraus schließen, daß die verschobenen Spektrallinien des Kanalstrahlenlichtes von Atomen ausgesandt werden, die sich in der Richtung der Kanalstrahlen bewegen. Mißt man die Größe der Verschiebung, d. h. die Aenderung der Schwingungsdauer infolge der Bewegung, so findet man, daß die Geschwindigkeit der bewegten strahlenden Atome dieselbe ist, die sich nach anderen Methoden als Geschwindigkeit der Kanalstrahlenpartikelchen ergibt. Aus der Starkschen Beobachtung folgt also, daß die Kanalstrahlenpartikelchen selber Licht emittieren. Sie stehen damit in schroffem Gegensatz zu den Kathodenstrahlpartikelchen, die an sich immer ganz lichtlos sind und nur das Gas, das die Strahlen absorbiert, zum Leuchten erregen.

Eine weitere Eigentümlichkeit der Kanalstrahlenpartikelchen ist, daß sie imstande sind ihre Ladung zu verlieren, ja sogar bisweilen eine negative Ladung anzunehmen. Es ist von W. Wien nachgewiesen worden, daß ein großer Teil der Partikelchen, die in einem Kanalstrahlenbündel durch den Raum eilen, die also vor der Kathode alle positiv geladen waren, ungeladen ist, ferner daß die ungeladenen Teilchen später auf ihrem Wege oft wieder Ladungen bekommen. Etwas Analoges kommt bei den Kathodenstrahlen niemals vor. Atome können ihre Ladung verlieren, ungeladene Elektronen gibt es nicht.

An diesen charakteristischen Unterschieden erkennen wir deutlich, daß im Vergleich mit den kompliziert gebauten Atomen das Elektron ein einheitliches, einfaches Partikelchen sein muß, das weder Lichtschwingungen machen kann, noch seine Ladung ändern kann.

Wir haben vorhin gesehen, daß ein glühender Körper Elektronen emittiert. In manchen Fällen kann er aber auch positive Ionen aussenden, besonders wenn er leicht verdampft. Gehrcke und Reichenheim haben beobachtet, daß eine Elektrode, die aus einem leichtverdampfbaren Salz eines Alkalimetalls hergestellt ist, beim Erhitzen im Vakuum eine Menge positiver Ionen abgibt. Lädt man sie auf ein hohes positives Potential, so geht ein starkes Strahlenbündel positiv geladener Partikelchen von ihr aus. Man bezeichnet dieses Phänomen als Anodenstrahlung. Die Anodenstrahlen bestehen aus schnell fliegenden, positiv geladenen Atomen des in dem erhitzten Salz vorhandenen Alkalimetalls, sie leuchten hell in dem für das Metall charakteristischen Licht, und man bemerkt an diesem den Dopplereffekt. Ueberhaupt unterscheiden sich die Anodenstrahlen in keiner Weise von Kanalstrahlen aus dem betreffenden Metalldampf.

Digitized by Google

Endlich haben wir noch bei den radioaktiven Prozessen das Auftreten von Strahlen positiv geladener Partikelchen erwähnt, die sogenannten α-Strahlen. Wie wir gesehen haben, bestehen diese aus Heliumatomen, es zeigt sich also wiederum, daß es keine positiven Elektronen gibt.

Es gibt nur eine einzige Art von Elektronen, diese tragen stets ein negatives elektrisches Elementarquantum.

Ueber den Aufbau der Atome ergibt sich nun ohne weiteres die folgende Vorstellung: Ein Atom besteht aus einem, im Vergleich zu einem Elektron großen Körper, der an und für sich positiv elektrisch ist, dessen Ladung aber durch eine Anzahl von Elektronen, die mit ihm leicht beweglich verbunden sind, im allgemeinen gerade kompensiert wird. Wird von dem Atom ein Elektron weggenommen, so bekommt es dadurch eine positive Ladung von 1 Elementarquantum, wird ihm ein Elektron hinzugefügt, so bekommt es eine negative Ladung von 1 Elementarquantum, die Ladungen eines Atoms müssen deswegen stets ganzzahlige Multipla von positiven oder negativen Elementarquanten sein.

4. Die Elektrizitätsleitung in Metallen. Ein Leiter ist ein Körper, in welchem Ionen, d. h. geladene Partikelchen, frei beweglich in sehr großer Zahl vorhanden sind. Wenn nun in dem Leiter ein elektrisches Feld vorhanden ist, so geben die freibeweglichen Ionen der auf sie wirkenden Kraft nach, die positiven wandern in der positiven Richtung der Feldlinien, die negativen umgekehrt, und diese Ionenwanderung ist der Vorgang, den man als „elektrischen Strom“ bezeichnet.

Diese einzig mögliche Theorie der Elektrizitätsleitung läßt sich bei der Klasse von Leitern, die man Elektrolyte nennt, ohne weiteres an der Erfahrung prüfen. Geht nämlich durch einen Elektrolyten ein Strom, so treten an den beiden Elektroden chemische Veränderungen ein, die im letzten Grunde davon herrühren, daß ein Bestandteil des Elektrolyten, den man das Anion nennt, an der Kathode teilweise verschwindet und an der Anode im gleichen Maß hervortritt, ein anderer, das Kation, umgekehrt an der Anode verschwindet und an der Kathode neu erscheint. Hier haben wir also die beiden wandernden Substanzen deutlich vor uns, und die Theorie der elektrolytischen Leitung basiert nun auf der Annahme, daß der Elektrolyt schon in der Lösung in die beiden Bestandteile Anion und Kation dissoziiert ist und daß die frei umherschwimmenden Partikelchen des ersteren negative Ladungen, die des anderen positive Ladungen tragen, in der Weise, daß sich im ganzen die Ladungen nach außen hin kompensieren. Aus den von Faraday entdeckten Gesetzen der Elektrolyse geht weiter hervor, daß die Ladung eines einzelnen Partikels immer entweder ein Elementarquantum oder ein ganzzahliges Multiplum davon ist.

So einfach es nach dieser Theorie war, das Wesen der elektrolytischen Leitung zu verstehen, so groß war die Schwierigkeit, die die metallischen Leiter vor der Entdeckung der Elektronen dem Verständnis entgegenstellten. Die metallischen Leiter bilden die andere große Gruppe leitender Körper, sie sind im Gegensatz zu den Elektrolyten scharf dadurch charakterisiert, daß der elektrische Strom in ihnen auch da, wo zwei verschiedene Metalle aneinandergrenzen, nicht die geringste Spur einer chemischen Aenderung hervorbringt. Es ist ohne weiteres klar, daß die Partikelchen, die in einem metallischen Leiter die Ladungen übertragen, nicht aus Stoffen bestehen können, die speziell diesem Leiter angehören, anderen aber nicht. Denn, wäre dies der Fall, so müßten beispielsweise beim Uebergange eines Stromes von Silber nach Kupfer die Silberkationen in das Kupfer eindringen und die Kupferanionen in das Silber; es müßten sich also in der Grenzschicht die beiden Metalle merkbar verändern. Da das nun nicht der Fall ist, so folgt, daß die Partikelchen, die in den metallischen Leitern die Ladungen übertragen, einen universellen Charakter haben, daß sie in all den verschiedenen Stoffen dieselben sind. In früheren Zeiten sah man sich zu der Annahme eines imponderablen elektrischen Fluidums gedrängt, das in den metallischen Leitern, wie eine materielle Flüssigkeit strömen kann. Heute kann es keinem Zweifel unterliegen, daß dieses früher so mysteriöse Fluidum aus den uns wohlbekannten Elektronen besteht. Denn die Elektronen sind geladene Partikelchen, die ein gemeinsamer Bestandteil aller Stoffe sind, und zwar sind sie, so viel wir wissen, die einzigen Partikelchen, denen dieser universelle Charakter zukommt.

Somit bekommen wir von einem metallischen Leiter das Bild, daß sich in seinem Innern, ohne daß irgendeine der in Abschnitt 2 besprochenen Wirkungen nötig ist, ganz spontan Elektronen von den Atomen ablösen. Da nun jedenfalls die Elektronen sehr klein im Vergleich zu den Atomen sind, so erfüllen sie die Poren des festen Gerüstes, das die ungeladenen Atome

Digitized by Google

und die positiv geladenen Restatome des metallischen Leiters bilden, in ähnlicher Weise, wie ein Gas die kleinen Poren in einem Stück trockenen Tons erfüllt, Poren, die immerhin im Vergleich zu den Gasmolekülen noch groß sind. Das negativ elektrische „Elektronengas" diffundiert unter dem Einfluß eines elektrischen Feldes in der dem Feld entgegengesetzten Richtung durch das poröse Gerüst der Atome und bildet so den elektrischen Strom.

Wieweit es möglich ist, nach dieser Theorie die besonderen Gesetze der metallischen Leitung, sowie die thermoelektrischen Spannungen zwischen zwei Metallen zu erklären, kann man in den Artikeln, die speziell über diese Dinge handeln, nachlesen (vgl. die Artikel „Elektrizitätsleitung", „Thermoelektrizität").

5. Die Lichtemission der Atome. In allen Körpern, die nicht zu den metallischen Leitern gehören, sind die Elektronen in den Atomen gebunden und können nur durch die in Abschnitt 2 beschriebenen Mittel in verhältnismäßig geringer Anzahl aus ihnen frei gemacht werden. Sie sind aber keineswegs starr an die Atome gefesselt, sondern wir müssen uns vorstellen, daß sie aus ihrer Gleichgewichtslage herausgebracht werden können und dann hin und her pendeln, wie wenn eine elastische Kraft sie in die Gleichgewichtslage zurückzutreiben suchte. Wenn elektrische Ladungen schnell hin und her bewegt werden, so strahlen elektrische Wellen von ihnen in den Raum aus. Die Wellen, die von den im Atom schwingenden Elektronen emittiert werden, sind das vom Atom ausgesandte Licht. Das Licht, das von einzelnen Atomen ausgeht, besteht aus einer Anzahl reiner Sinuswellen; es gibt im Spektroskop ein Linienspektrum, d. h. ein Spektrum, das aus einer Reihe scharfer Linien besteht, jede Linie entspricht einer ganz bestimmten Schwingungszahl. Jedem Atom kommt ein charakteristisches Spektrum zu, dessen Linien sich in gewissen regelmäßigen Serien ordnen lassen. Wir ersehen daraus, daß in dem Atom elektrische Oszillatoren vorhanden sind, die regelmäßige, lang andauernde, rein periodische Schwingungen ausführen. Diese Oszillatoren sind nach unserer Theorie die Elektronen. Ob ein Elektron verschiedene Schwingungen ausführen kann, den verschiedenen Schwingungszahlen des Atomspektrums entsprechend, oder ob das Licht einer anderen Spektrallinie immer von einem anderen Elektron ausgeht, darüber wissen wir nichts. Daß es aber jedenfalls schwingende Elektronen in den Atomen sind, die das Licht hervorbringen, wird mit ziemlich großer Sicherheit bewiesen durch das Zeemansche Phänomen.

Bringt man eine Lichtquelle, die ein Linienspektrum hat, in ein starkes Magnetfeld hinein, so beobachtet man, daß das Feld die Atomschwingungen in gesetzmäßiger Weise beeinflußt. Jede der rein periodischen Schwingungen wird durch verzögernde und beschleunigende Kräfte des magnetischen Feldes in mehrere Schwingungen von nur äußerst wenig differierenden Schwingungszahlen zerlegt. Mit einem sehr scharf zerlegenden Spektroskop beobachtet man daher, wie Zeeman entdeckt hat, eine Aufspaltung jeder einzelnen Spektrallinie durch das magnetische Feld in mehrere sehr dicht beieinander liegende „Komponenten". Diese Komponenten sind außerdem in bestimmter Weise polarisiert. Man kann das Zeemansche Phänomen theoretisch vorhersagen, wenn man annimmt, daß das Licht von einem elektrisch geladenen Teilchen ausgeht, das einfach nach den Pendelgesetzen um seine Gleichgewichtslage oszilliert. Unter dieser einfachen Annahme ergibt die Theorie, daß das Licht, das senkrecht zu den Linien des magnetischen Feldes ausstrahlt, in drei linear polarisierte Komponenten zerlegt werden muß, dagegen das Licht, das in der Richtung der Feldlinien etwa durch eine Längsbohrung der Polschuhe austritt, in zwei einander entgegengesetzt zirkular-polarisierte Komponenten. Diese ganz einfache Form des Zeemanschen Phänomens beobachtet man tatsächlich an den Schwingungen eines Atoms, nämlich des Heliumatoms. Das Spektrum des Heliums zeigt eine große Anzahl von Linien, und jede dieser Linien wird im magnetischen Felde genau in der Weise zerspalten, wie es die einfache Theorie angibt. Es ist deswegen höchst interessant, das Zeemansche Phänomen an den Heliumlinien mit der Theorie auch quantitativ zu vergleichen. Nach der Theorie ist es möglich, aus dem Rotationssinn der zirkular polarisierten Komponenten des parallel zu den Feldlinien ausgestrahlten Lichtes das Vorzeichen der Ladung der im Atom schwingenden Partikelchen zu ermitteln und ferner aus der Differenz der Wellenlängen der beiden Komponenten, die durch eine bekannte magnetische Feldstärke hervorgebracht wird, das Verhältnis e/m der Ladung zu der trägen Masse der schwingenden Teilchen zu berechnen. Der Rotationssinn der Zirkularpolarisation ergibt, daß die schwingenden Teilchen im Atom negativ geladen sind, die Größe des Zeemaneffektes ergibt für e/m den Wert $1{,}77 . 10^8$ Coulomb/Gramm.

Hieraus darf man den Schluß ziehen, daß im Heliumatom die lichterregenden Teilchen nichts anderes sind als Elektronen, die nach dem

Digitized by Google

Pendelgesetz, jedes unabhängig von den übrigen, um ihre Gleichgewichtslagen schwingen, und zwar Elektronen, die vollkommen identisch sind, mit den schon anderweit bekannten Elektronen.

Die eben besprochene einfache Form zeigt das Zeemansche Phänomen allerdings nur bei dem Heliumatom. Alle anderen Atome zeigen kompliziertere Erscheinungen, wenn man sie einem starken Magnetfeld aussetzt, während sie schwingen. Man kann eine größere Zahl von Typen des Zeemanschen Phänomens unterscheiden, die außerordentlich interessante Gesetzmäßigkeiten aufweisen. Alle stimmen im Rotationssinn des zirkularpolarisierten Lichtes, das parallel zu den Kraftlinien austritt, überein, außerdem ist die Größenordnung des Effektes überall die gleiche. Man schließt hieraus, daß die Lichtschwingungen der Linienspektra der Atome zwar immer von den uns bekannten Elektronen ausgehen, aber im allgemeinen nicht von einzelnen Elektronen, die nach dem Pendelgesetz schwingen, sondern von mehreren durch uns noch unbekannte Kraftwirkungen miteinander verkoppelten Elektronen.

Es verdient übrigens besondere Beachtung, daß man in dem Licht, das leuchtende Gase in Geißlerschen Röhren, im Lichtbogen oder in einer durch ein Metallsalz gefärbten Bunsenflamme zeigen, keineswegs bloß Linienspektren beobachtet. Es gibt noch eine zweite Art von Spektren, die allerdings nicht dem einzelnen Atom, sondern dem ganzen Molekül des leuchtenden Dampfes oder Gases zukommen, das sind die Bandenspektra. Man sieht hier an Stelle der scharfen Linien. breitere Banden, die im allgemeinen an der einen Seite, der sogenannte Kante scharf begrenzt sind, auf der anderen Seite dagegen allmählich ins Dunkle verlaufen. Die Banden zeigen im magnetischen Feld keine Spur vom Zeemanschen Phänomen, sie können also nicht von schwingenden Elektronen herrühren. Wie sie aber zustande kommen, darüber wissen wir bisher noch gar nichts, nur so viel ist sicher daraus zu sehen, daß sich im Innern der Atome noch manche uns ganz unbekannte und rätselhafte Vorgänge abspielen.

Feste und flüssige Körper geben bei Glut kontinuierliche Spektren. Wie weit die einzelnen Bestandteile ihres Lichtes auf Elektronenschwingungen oder auf andere uns noch unbekannte Vorgänge zurückzuführen sind, läßt sich bei dem völligen Mangel einer Struktur des Spektrums natürlich nicht sagen.

6. Die Abhängigkeit der trägen Masse von der Geschwindigkeit. Wie schon oben erwähnt wurde, haben die β-Strahlen dadurch eine ganz besondere Bedeutung für uns, weil wir in ihnen Partikelchen haben, die mit Geschwindigkeiten fliegen, wie sie sonst niemals bei irgendwelchen materiellen Körpern vorkommen. Theoretische Erwägungen, über die wir im folgenden noch berichten werden, hatten es nahe gelegt, zu untersuchen, ob bei den enormen Geschwindigkeiten der Elektronen in den β-Strahlen noch das Gesetz von der Konstanz der trägen Masse gilt, das bis vor kurzem als eines der fundamentalen Naturgesetze betrachtet wurde. Kaufmann führte diese Untersuchung mit großer Sorgfalt durch. Er benutzte dieselbe Methode, die schon bei den Kathodenstrahlpartikelchen ausgearbeitet war (vgl. 2), nämlich Messung der Ablenkung der Strahlen in einem elektrischen und in einem magnetischen Felde von bekannter Stärke. Wie wir in 2 gesehen haben, liefern diese Messungen zwei Gleichungen für die Unbekannten: Ladung e, träge Masse m, Geschwindigkeit v. Die beiden ersten kommen aber nur als Quotient e/m vor, man kann deswegen aus den beiden Gleichungen die Größe e/m und die Größe v gesondert berechnen. In der untenstehenden Tabelle sind die zugehörigen Werte v und e/m zusammengestellt, die sich aus einer Reihe Kaufmannscher Messungen ergeben. Ich muß dabei aber nachdrücklich hervorheben, daß ich mir erlaubt habe, an den von Kaufmann gemessenen Werten eine Korrektur anzubringen. Eine Diskussion der Kaufmannschen Resultate ergibt nämlich (vgl. M. Planck, Berichte der Deutschen Physikalischen Gesellschaft 5, S. 301, 1907), daß in den Messungen trotz aller aufgewandten Sorgfalt noch ein systematischer Fehler stecken muß, der vielleicht darin besteht, daß für die elektrische Feldstärke ein zu großer Wert gerechnet ist, jedenfalls ein Fehler, der das Resultat in dieser Richtung beeinflußt. Die Zahlen in der folgenden Tabelle sind aus den Kaufmannschen Zahlen dadurch gewonnen, daß die elektrische Feldstärke um 10½% kleiner angenommen worden ist, als Kaufmann angibt. Die beiden ersten Kolonnen enthalten die aus den Messungen nach dieser Korrektur gefundenen Werte v und e/m, wobei statt der in cm/sec gerechneten Geschwindigkeit v der Wert $\beta = v : 3.10^{10}$ eingesetzt ist, der sich ergibt, wenn man die Lichtgeschwindigkeit (3.10^{10} cm/sec) als Einheit nimmt. Die letzte Kolonne gestattet den Vergleich von e/m mit der Formel $1{,}75.10^{8}.\sqrt{1-\beta^2}$, die, wie man sieht, den Verlauf von e/m ziemlich genau wiedergibt, und die zugleich zeigt, daß sich die Werte e/m für

kleines β an den durch die Messungen an Kathodenstrahlen gefundenen Wert $1{,}75 . 10^8$ gut anschließen. Würde man die Kaufmannschen Messungen ohne die von mir vorgenommene Korrektur benutzen, so würde an dem Verlauf der Größe e/m als Funktion von β nur wenig geändert, aber der Anschluß für kleines β an $1{,}75 . 10^8$ wäre weniger gut.

Kaufmanns Messungen von e/m an β-Strahlen.

$\beta = v:3 . 10^{10}$	$\frac{e}{m} . 10^{-8}$	$1{,}75 . \sqrt{1-\beta^2}$
0,926	0,67	0,66
0,861	0,89	0,89
0,807	1,04	1,02
0,756	1,18	1,15
0,699	1,26	1,26
0,646	1,33	1,33
0,603	1,40	1,40
0,569	1,45	1,45
0,533	1,50	1,48

Aus dieser Tabelle sieht man zweierlei: Erstens, die Geschwindigkeit auch der allerschnellsten β-Strahl-Partikelchen ist doch immer noch etwas kleiner als die Lichtgeschwindigkeit; zweitens, sobald sich die Geschwindigkeit eines Teilchens der Lichtgeschwindigkeit nähert, sinkt das Verhältnis e/m sehr stark; wenn die Formel $1{,}75 . 10^8 . \sqrt{1-\beta^2}$ auch für eine beliebig große Annäherung an die Lichtgeschwindigkeit gültig bleibt, so muß e/m schließlich beliebig nahe zu Null heruntergehen. Wir haben uns nun zu fragen, ob sich in e/m der Zähler oder der Nenner oder gar beide mit der Geschwindigkeit ändern. Die Landung e des Teilchens zeigt sich daran, daß radial von ihm nach allen Seiten elektrische Feldlinien ausgehen. Sobald sich die Ladung änderte, müßte sich auch die Anzahl der Feldlinien ändern. Die Gesetze, nach denen sich ein elektrisches Feld ändern kann, sind nun aber genau bekannt, diese Gesetze beherrschen all die mannigfaltigen elektromagnetischen Erscheinungen, auch die Lichtwellen usw.; ihre Konsequenzen sind also außerordentlich oft und genau nachgeprüft und wir können nichts von ihnen aufgeben, wenn wir nicht behaupten wollen, daß ein großer Teil all unserer experimentellen Erfahrungen auf groben Irrtümern und verkehrten Beobachtungen beruhe. Nun sind aber diese Gesetze, die wir demnach unbedingt als Basis unserer weiteren Forschungen annehmen müssen, ganz unvereinbar mit einer Veränderlichkeit der von einem geladenen Körper ausgehenden Feldlinien bei Bewegungen. Es ist also ganz unmöglich, anzunehmen, daß sich der Zähler e mit der Geschwindigkeit des Elektrons ändert. Da sich e/m ändert, so folgt hieraus, daß die träge Masse m nicht konstant ist, daß sie vielmehr eine Funktion der Geschwindigkeit ist, die mit wachsender Geschwindigkeit mehr und mehr zunimmt und schließlich, wenn die Geschwindigkeit dem Grenzwert $3 . 10^{10}$ cm/sec nahe kommt, über alle Grenzen hinaus wächst.

Dieses Verhalten der trägen Masse macht es, wie man sieht, unmöglich, daß die Geschwindigkeit den Wert $3 . 10^{10}$ je erreicht, weil beim Näherkommen an diesen Wert der Trägheitswiderstand der Partikeln gegen die beschleunigende Kraft schließlich unendlich groß wird.

7. Das Wesen der Elektronen und der Materie überhaupt. Wenn man sich die in 3 beschriebene Struktur der Atome etwas genauer durchdenkt, so findet man, daß die Elektronentheorie die Behauptung in sich schließt: „es existiert keine Materie ohne elektrische Ladung". Elektrische Ladung ist also wenigstens zum Teil das Wesen der Materie selbst. Andererseits ist „elektrische Ladung" nur das Wort für „Ausgangsstelle eines elektrischen Feldes". Es gibt bekanntlich zwei Arten solcher Ausgangsstellen, nämlich positive Ladungen, aus denen die Feldlinien (in dem Sinn, wie wir gewohnt sind zu rechnen) heraustreten, und negative Ladungen, in die die Feldlinien hineinlaufen. Im reinen Aether gibt es solche Ausgangsstellen elektrischer Felder nicht. Sie kommen nur als Elektronen und als positive Restatome vor, sie bilden also die Elementarteilchen der Materie. Wir können danach die Elementarteilchen der Materie im wesentlichen als die Knotenstellen der elektrischen Felder im Aether auffassen. Warum die Ladungen nur in diesen engbegrenzten Knotenstellen zusammengedrängt vorkommen, warum sie sich nicht der Expansionskraft der elektrischen Felder folgend über möglichst weite Bereiche ausbreiten, läßt sich nicht genau sagen. Es muß jedenfalls noch besondere mit den Ladungen verbundene Kräfte geben, die sie zusammenhalten, und die ich die „Kohäsionskräfte" der Knotenstellen nennen möchte, obwohl wir noch nichts Näheres von ihnen wissen. Die Expansionskraft des Feldes und die Kohäsionskraft der Knotenstelle zusammen machen erst die Existenz der räumlich begrenzten und undurchdringlichen materiellen Elementarteilchen möglich. Wenn aus irgendeiner Ursache auf einer Seite des Elementarteilchens die Ladungen aus dem Bereich hervortreten, so muß die Kohäsionskraft bewirken, daß

Digitized by Google

zugleich auf der anderen Seite die Grenze der Ladung sich in den ursprünglichen Bereich hineinzieht, so daß das von der Ladung erfüllte Volumen im ganzen wieder ungeändert bleibt. In dieser Weise können sich die Knotenstellen durch den Aether hindurchbewegen, ohne sich sonst zu ändern. Der Weltäther selber ist seiner Natur nach absolut unbeweglich und vollkommen durchdringlich für die Atome und Elektronen. Diese wichtige Grundannahme der modernen Elektronentheorie ist nur verständlich, wenn man eingesehen hat, daß in der soeben geschilderten Weise die Elementarteilchen der Materie weiter nichts sind als Stellen singulären Verhaltens im Aether selber: Knotenstellen der elektrischen Felder.

Nach dieser Auffassung ist also die Bewegung der Materie ein Vorgang der Aetherphysik und zwar hauptsächlich ein elektromagnetischer Vorgang. Die Bewegung besteht im wesentlichen darin, daß sich die Kraftfelder im Aether mitsamt den Knotenstellen, die zu ihnen gehören, umlagern und verschieben. Die Ursache für das Entstehen einer Bewegung ist stets die, daß die Gleichgewichtsbedingungen der Aetherfelder nicht erfüllt sind. Die Energie der Bewegung eines Elektrons oder eines Atoms ist nichts anderes als die Energie gewisser Vorgänge im Aether, die die Verschiebung der Knotenstellen begleiten und die nicht da wären, wenn die Knotenstellen ruhten. Wenn beispielsweise ein Elektron durch den Raum vorrückt, so muß sein ganzes elektrisches Feld mitgehen. Nun kann aber, wie aus der Elektrizitätslehre bekannt ist, ein elektrisches Feld im Aether nicht anders von einer Stelle zu einer anderen übertragen werden, als daß ein magnetischer Zustand im Aether eintritt, der die Uebertragung besorgt. Ein bewegtes Elektron muß deswegen stets noch von einem magnetischen Feld umgeben sein. Die Linien dieses Feldes bilden Kreisringe um das dahinfliegende Elektron herum, seine Stärke ist an jeder Stelle proportional mit dem Produkt aus der übertragenen elektrischen Feldstärke und der Geschwindigkeit der Uebertragung. Da weiter die Energie des magnetischen Feldes an jeder Stelle mit dem Quadrat seiner Feldstärke proportional ist, so involviert das magnetische Feld, das bei einer Bewegung des Elektrons zu dem elektrischen Feld hinzutreten muß, im ganzen eine Energiemenge, die mit dem Quadrat der Geschwindigkeit proportional ist. Man sieht ein, das dies sehr wohl die Energie sein könnte, die wir gewohnt sind als Bewegungsenergie zu bezeichnen, denn diese wächst tatsächlich wie das Quadrat der Geschwindigkeit. Nun ist aber die eben angestellte Ueberlegung noch in einer Hinsicht unvollkommen. Da sich nicht nur das elektrische, sondern auch das magnetische Feld mit dem Elektron zusammen fortbewegt, so muß noch eine Wirkung vorhanden sein, die das magnetische Feld überträgt. Das geschieht nun nach der Lehre von Elektromagnetismus durch ein elektrisches Feld, das nicht völlig im Gleichgewicht ist. Bei einem bewegten Elektron müssen sich also die elektrischen Feldlinien ein wenig aus der Gleichgewichtslage, die sie beim ruhenden Elektron haben, heraus verschieben, in der Weise, daß sie gerade imstande sind, das magnetische Feld zu übertragen. In dieser Weise übertragen sich dann elektrisches und magnetisches Feld gegenseitig durch den Raum gerade mit der Geschwindigkeit des Elektrons. Nun hat aber die Veränderung des elektrischen Feldes eine kleine Energieaufnahme zur Folge, außerdem wird dadurch bewirkt, daß das magnetische Feld nicht in der einfachen Weise, wie es bei einem unveränderlichen elektrischen Feld wäre, überall proportional mit der Geschwindigkeit zunimmt, beides zusammen hat das Resultat, daß die Bewegungsenergie des Elektrons, soweit sie in dem elektromagnetischen Felde steckt, nicht ganz genau proportional mit dem Quadrat der Geschwindigkeit zunimmt. Mit anderen Worten die Trägheit des Elektrons, d. h. der Faktor der mit $\frac{1}{2} v^2$ multipliziert die Bewegungsenergie ergibt, kann nicht ganz konstant sein. Es läßt sich zeigen, daß die Abweichung von der Konstanz erst bei Geschwindigkeiten merkbar werden kann, die nicht mehr weit unter der Lichtgeschwindigkeit liegen, daß die Trägheit aber bei diesen großen Geschwindigkeiten rapide wächst und schließlich über alle Grenzen hinausgeht, wenn man der Lichtgeschwindigkeit näher kommt.

Diese Konsequenz der Theorie war es, die Kaufmann zuerst experimentell geprüft und, wie wir in 6. gesehen haben, tatsächlich bestätigt gefunden hat. Man hat nun lange Zeit aus den Kaufmannschen Versuchen die Folgerung ziehen wollen, daß die Trägheitswirkung des Elektrons rein in seinem elektromagnetischen Felde steckte. Abraham entwickelte die Theorie eines Elektrons, das eine starre, elektrisch geladene Kugel bildete und bei der Bewegung nur eine Energiezufuhr zu seinem elektromagnetischen Feld in der eben beschriebenen Weise nötig hatte. Er wies nach, daß man bei einem sehr schnell bewegten Elektron streng unterscheiden müsse zwischen dem Trägheitswiderstand, den es einer Beschleunigung in seiner eigenen Bewegungsrichtung entgegensetzt, und dem Trägheitswiderstand gegen eine Ablenkung aus seiner Bewegungsrichtung, ohne daß dabei der

Digitized by Google

absolute Wert der Geschwindigkeit geändert wird. Man unterscheidet danach die longitudinale Trägheit und die transversale Trägheit des schnell bewegten Elektrons. Die Kaufmannschen Messungen ergeben offenbar die zweite von diesen Größen. Vergleicht man die Kaufmannschen Werte, mit denen, die die Abrahamsche Theorie für die transversale Trägheit liefert, so findet man auch wirklich eine ungefähre Uebereinstimmung.

Die Theorie des starren Elektrons ist aber nicht in Einklang mit der oben geschilderten Vorstellung, daß sich das Elektron durch das Gleichgewicht zwischen Expansionskraft des Feldes und Kohäsionskraft der Knotenstelle herstellt. Um ein schnell bewegtes Elektron ordnen sich, wie wir schon gesehen haben, die elektrischen Feldlinien etwas anders an, wie um ein ruhendes. Und zwar geschieht das in der Weise, daß das Feld in der Gegend der beiden Pole des Elektrons, wenn man die Richtung der Bewegung als seine Achse nimmt, schwächer wird, in der Aequatorialzone dagegen etwas stärker. Man sollte also erwarten, daß das Elektron sich bei der Bewegung aus einer Kugel in ein abgeplattetes Ellipsoid verwandelte, entsprechend den veränderten Zugkräften, die sein elektrisches Feld auf die Ladungen ausübt. Wie weit diese Abplattung geht, könnte man natürlich nur angeben, wenn man etwas über die Art wüßte, wie sich die Kohäsionskräfte der Knotenstelle bei der Bewegung verhalten. Obwohl man nun noch gar nichts Näheres über diese Kräfte weiß, so hat man doch allen Grund anzunehmen, daß sie ein Prinzip befolgen, das, wie es scheint, eine ganz universelle Bedeutung hat, nämlich das Relativitätsprinzip. Man kann dieses etwa folgendermaßen formulieren:

Alle Wirkungen des Aethers sind durch derartige Gesetzmäßigkeiten beherrscht, daß die Beobachtungen an einem mit konstanter gleichgerichteter Geschwindigkeit fortbewegten materiellen System, die ein mitbewegter Beobachter macht, mathematisch genau übereinstimmen mit Beobachtungen, die man an einem aus denselben Elementarpartikelchen zusammengesetzten System machen würde, wenn es absolut ruhte und mit ihm der Beobachter.

Aus diesem Prinzip läßt sich durch ein Schlußverfahren, das an dieser Stelle nicht wiedergegeben werden kann, der Beweis führen, daß die Form, die das bewegte Elektron bei Gleichgewicht der elektrischen Expansionskraft mit der Kohäsionskraft der Knotenstelle annimmt, die eines abgeplatteten Ellipsoids ist. Und zwar entsteht dies Ellipsoid aus der Kugelform des ruhenden Elektrons in der Weise, daß sich seine Achse in der Bewegungsrichtung im Verhältnis $\sqrt{1-\beta^2}$ ($\beta = v:3.10^{10}$) zusammenzieht, während seine Dimensionen in der Aequatorialebene ungeändert bleiben.

Ferner läßt sich nun zeigen, wie es zuerst H. A. Lorentz getan hat, daß die transversale Trägheit eines Elektrons darzustellen ist durch die Formel: $m_t = m_0 \cdot \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}$, die longitudinale Trägheit durch die Formel: $m_l = m_0 \cdot \frac{1}{\sqrt{(1-\beta^2)^3}}$. m_0 bedeutet hier beide Male die Trägheit bei sehr kleinen Geschwindigkeiten (β unendlich klein). Es ist von Interesse zu sehen, daß die Kaufmannschen Messungen, wenigstens nach der von mir vorgenommenen Korrektur mit der Formel für m_t ganz genau übereinstimmen. Immerhin darf man diese Uebereinstimmung nicht als beweisend ansehen, so lange der Fehler, der den Kaufmannschen Messungen noch anzuhaften scheint, nicht durch neue Experimente eliminiert ist. Sehr spricht für die Richtigkeit der Lorentzschen Formeln noch der Umstand, daß neuere Untersuchungen an schnell bewegten Elektronen von Bucherer und von Hupka nach zwei ganz verschiedenen Methoden eine gute Uebereinstimmung mit der Relativitätstheorie ergeben haben.

Die Formeln von Lorentz sind dadurch ausgezeichnet, daß sie sich aus der Relativitätstheorie herleiten lassen, ohne daß man eine besondere Annahme darüber macht, ob die Trägheit nur auf elektromagnetischen Wirkungen beruht oder ob noch irgendwelche andere Wirkungen, die beispielsweise mit den Kohäsionskräften der Knotenstellen zusammenhängen könnten, mit dazu kommen. Die Lorentzschen Formeln müssen nach der Relativitätstheorie auch ohne weiteres für die materiellen Atome gültig sein, ganz gleichgültig, in welcher Weise sie aus den Elementarteilchen aufgebaut sind. So schön es einerseits für die Relativitätstheorie ist, daß sie derartige allgemein geltende Folgerungen liefert, so bedauerlich ist es auf der anderen Seite, daß man aus den Messungen der Elektronenträgheit nicht die geringsten Schlüsse auf den inneren Bau der Elektronen, auf die Art ihrer Kohäsionskräfte, ja nicht einmal auf ihre Form und ihre Größe ziehen kann.

Literatur. *Siehe die Literatur in den Artikeln Glimmentladung, Kathodenstrahlen, Glühelektrische Erscheinungen, Lichtelektrische Erschei-*

Digitized by Google

nungen, Röntgenstrahlen, Radioaktivität, Elektrizitätsleitung, Thermoelektrizität, Spektroskopie, Magnetooptik, Physikalische Prinzipien. — Ein zusammenfassendes Werk über die theoretische Seite des Gegenstandes mit den nötigen mathematischen Entwickelungen ist: **H. A. Lorentz**, *The Theory of Electrons. Leipzig 1909.*

G. Mie.

Elektrooptik.

1. Vorbemerkungen: a) Elektrische Felder. b) Nichtleiter und Leiter im elektrischen Feld. c) Allgemeine Charakteristik der elektrooptischen Effekte. d) Beobachtungsmethoden. e) Direkte und indirekte Wirkungen. 2. Elektrooptische Effekte an isotropen Körpern: a) Erste Beobachtungen an Flüssigkeiten; das Fundamentalgesetz der elektrischen Doppelbrechung. b) Relative Bestimmungen. c) Beobachtungen an festen Körpern. d) Beobachtungen über absolute Geschwindigkeitsänderungen. e) Beobachtungen über die Trägheit elektrooptischer Effekte. 3. Elektrooptische Effekte an Kristallen. 4. Theoretische Ueberlegungen: a) Allgemeine Gesichtspunkte. b) Spezielle Hypothesen.

1. Vorbemerkungen. 1a) Elektrische Felder. Wie die Magnetooptik (vgl. den Artikel „Magnetooptik", Bd. VI, S. 702), so beschäftigt sich auch die Elektrooptik mit Veränderungen der optischen Eigenschaften der Körper infolge der Einwirkung eines von außen auf das Innere der Körper wirkenden Agens, dort eines magnetischen, hier eines elektrischen Feldes.

Ein solches Feld besteht in der Umgebung jeder elektrischen Ladung und wird anschaulich gemacht durch seine Kraftlinien, d. h. durch Kurven, deren Richtung an jeder Stelle mit der Richtung der dort auf eine eingebrachte kleine positive Ladung wirkenden Kraft zusammenfällt. Im einfachsten Falle entgegengesetzt gleicher Punktladungen gehen die Kraftlinien des Feldes sämtlich von der positiven Ladung aus und endigen in der negativen.

Dieser Fall ist in Annäherung realisiert durch zwei kugelförmige Konduktoren einer Elektrisiermaschine oder eines Funkeninduktors, wenn ihre Entfernung groß ist gegen ihren Radius.

Bei gleicher Steigerung der Ladungen beider Kugeln wächst die Feldstärke proportional mit den Ladungen. Einer Vergrößerung der Feldstärke auf diesem Wege ist eine Grenze durch den Umstand gesetzt, daß bei einem gewissen Betrag der Feldstärke die „Elektrische Festigkeit" des Zwischenmediums zwischen den Konduktoren nicht mehr ausreicht, um der Anziehung zwischen den beiderseitigen Ladungen entgegenzuwirken, und daß dann eine Vereinigung derselben durch eine Funkenentladung eintritt. Die elektrische Festigkeit ist je nach der Art des Mediums, in dem sich die Konduktoren befinden, verschieden. Feste und flüssige Nichtleiter haben größere Festigkeit als Gase.

Das Feld in der Umgebung zweier entgegengesetzt geladenen Kugelkonduktoren ist inhomogen, d. h., Größe und Richtung der Feldstärke wechselt von Ort zu Ort. Man erhält Felder von nahezu konstanter Größe und Richtung zwischen zwei einander parallelen plattenförmigen Konduktoren mit entgegengesetzten Ladungen, und zwar ist die Homogenität um so vollkommener, je geringer die Entfernung der beiden Platten im Vergleich zu ihrer Größe ist. Außerhalb des bezeichneten Gebietes sind die Felder wieder inhomogen und beträchtlich schwächer als innerhalb. Ein solches Plattenpaar wird als Kondensator bezeichnet.

Die Feldstärke, welche ein einmal aufgeladenes Leitersystem, z. B. ein Kondensator, liefert, ist im allgemeinen wegen der Ladungsverluste durch Leitung zeitlich veränderlich. Um sie konstant zu erhalten, muß die Ladung etwa durch geeignetes Arbeiten einer Influenzmaschine oder aber durch Anlegen einer konstanten Spannung, wie sie eine Akkumulatorenbatterie oder eine dynamoelektrische Maschine liefert — konstant erhalten werden. Ist die Spannung (oder Potentialdifferenz) v zwischen den beiden Kondensatorplatten gegeben, so bestimmt sich die Feldstärke im Zwischenraum durch den Quotienten v/a, unter a den Abstand der Platten verstanden.

1b) Nichtleiter und Leiter im elektrischen Felde. Um einen Körper einem elektrischen Felde auszusetzen, bringt man ihn einfach in dasselbe. Es fließen dann, wenn er ein Nichtleiter ist, die Kraftlinien durch ihn hindurch, allerdings nicht ohne Aenderung, sondern in einer von Form und Natur des Körpers abhängigen Deformation. Letztere entsteht dadurch, daß der eingebrachte Körper durch Influenz elektrisiert wird und demgemäß selbst Ladungen annimmt, von denen ein Feld ausgeht. Infolge hiervon ist die Feldstärke im Innern des eingebrachten Nichtleiters im allgemeinen stets kleiner, als sie an der bezüglichen Stelle vor Einbringung des Körpers war.

Eine Ausnahme bildet ein Kondensator, an den eine konstante Spannung angelegt ist, und eine den Innenraum ausfüllende Platte aus einem Nichtleiter. Hier behält die Feldstärke den früheren Wert v/a bei, weil die auf der eingelegten Platte entstehenden Ladungen in ihrer Wirkung durch

Digitized by Google

auf den Kondensator nachströmende Ladungen kompensiert werden.

Innerhalb leitender Körper können statische elektrische Felder überhaupt nicht bestehen. Bringt man dergleichen Körper in ein elektrisches Feld, so entstehen auf ihrer Oberfläche influenzierte Ladungen, deren Feld im Innern des Leiters die Wirkung der ursprünglich das Feld erregenden gerade kompensiert. Die Kraftlinien des Feldes endigen dabei in diesen auf der Oberfläche influenzierten Ladungen und vermögen nicht ins Innere des Leiters einzudringen.

Variable Felder, wie sie in elektromagnetischen Wellen herrschen, pflanzen sich allerdings auch in Leiter hinein fort, aber im allgemeinen nur in sehr verringerter Stärke.

1c) Allgemeine Charakteristik der elektrooptischen Effekte. Im Gebiete der Magnetooptik sind nach Bd. VI, S. 703fg. Wirkungen der Magnetfelder sowohl auf Emissions- als auf Absorptions- oder Fortpflanzungserscheinungen bekannt, und erstere geben ein wichtiges Hilfsmittel für das Verständnis und die theoretische Beherrschung der letzteren. Im Gebiete der Eletrooptik sind Wirkungen der ersten Art bisher noch nicht entdeckt, und dadurch fehlt in demselben auch ein so einfacher leitender Grundgedanke, wie er in der Magnetooptik durch den sogenannten Zeeman-Effekt an die Hand gegeben wurde. Dieser Effekt stellte sich nach Bd. VI, S. 703 am deutlichsten bei gewissen feinen Linien in Emissionsspektren dar, die in mehrere Komponenten zerlegt werden, wenn auf die emittierende Lichtquelle ein Magnetfeld wirkt. Beobachtungen analoger Art mit elektrischen statt mit magnetischen Feldern scheitern deshalb, weil emittierende Lichtquellen der Regel nach Leiter der Elektrizität sind, und weil (wie oben gesagt) es unmöglich ist, im Innern von Leitern statische elektrische Felder zu erzeugen. Versuche mit Wechselfeldern, die bis zu einem gewissen Grade in Leiter eindringen, sind zwar gemacht worden, haben aber bisher zu bestimmten Ergebnissen nicht geführt.

Alle erfolgreichen Beobachtungen auf elektrooptischem Gebiete beziehen sich bisher auf die Veränderung des Verhaltens der Körper gegenüber in ihnen fortschreitenden Lichtwellen durch das elektrische Feld und zwar, noch spezieller, fast nur auf die Veränderung der Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Wellen; über Veränderung der Absorption durch das Feld liegen nur erst ganz vereinzelte Wahrnehmungen vor. Da nun nach moderner Auffassung, wie Bd. VI, S. 707fg. erörtert, die Gesetze der Fortpflanzungsgeschwindigkeit resp. der Dispersion durch die Absorptionen innerhalb der Körper bedingt werden, so fehlt für die theoretische Deutung der elektrooptischen Erscheinungen ein sehr wesentliches Hilfsmittel, das sich in der Magnetooptik fruchtbar erwiesen hat.

Die an isotropen Körpern durchgeführten Beobachtungen, welche sich in erster Linie auf flüssige und feste Körper, in geringem Umfange auch auf Gase und Dämpfe beziehen, haben übereinstimmend ergeben, daß diese Körper in einem elektrischen Felde das optische Verhalten einachsiger Kristalle annehmen, deren Achse in die Richtung der elektrischen Kraftlinien fällt, d. h., im allgemeinen zerlegt sich eine einfallende Welle in zwei normal zueinander polarisierte von verschiedenen Fortpflanzungsgeschwindigkeiten. Die Differenz der beiden Geschwindigkeiten muß nach Symmetrie gleich Null sein für Wellen, die parallel den Kraftlinien fortschreiten (in welcher Richtung Beobachtungen unbequem sind), sie nimmt mit der Neigung der Fortpflanzungsrichtung gegen die Kraftlinien zu und erreicht ein Maximum in der dazu normalen Richtung, in der der Regel nach beobachtet wird.

Dieser Verlauf der Differenz der beiden Geschwindigkeiten oder der Doppelbrechung entsteht in der Weise, daß die eine der beiden Wellen, die in einer Ebene durch die Richtung der Feldstärke polarisiert ist, eine von der Fortpflanzungsrichtung unabhängige Geschwindigkeit besitzt, die andere, normal zur Feldstärke polarisierte, eine von der Richtung abhängige. Die erstere Welle nennt man die ordentliche, die zweite die außerordentliche.

Es mag erinnert werden, daß mit der Geschwindigkeit ω einer Lichtwelle in einem Körper der Brechungsindex n des letzteren zusammenhängt gemäß der Formel $n=c/\omega$, unter c die Geschwindigkeit im Vakuum verstanden.

Komplizierter stellen sich die elektrooptischen Effekte bei Kristallen dar, welche schon von Natur doppelbrechend sind; hier gibt die Wirkung des Feldes Aenderungen der ursprünglichen Doppelbrechung, die je nach der Orientierung des Kristalles gegen das Feld verschieden sind. Außerdem treten bei Kristallen von gewissen Symmetrien singuläre Effekte auf, die sich von den bei isotropen Körpern beobachteten wesentlich unterscheiden.

1d) Beobachtungsmethoden. Eine Doppelbrechung kann man nachweisen, indem man den bezüglichen Körper zwischen gekreuzten Polarisatoren beobachtet. Ist er einfach brechend (optisch isotrop), so erscheint er dabei in jeder Position dunkel; ist er doppelbrechend (optisch äolotrop), so hellt er sich in bestimmten Positionen auf. Die Aufhellung ist für eine kristallinische Platte dann am intensivsten, wenn die Polarisationsebenen der beiden in der Platte fort-

Digitized by Google

schreitenden Wellen die Winkel zwischen den bezüglichen Ebenen der Polarisatoren halbieren. Wenn man nach Symmetrierücksichten (wie z. B. im vorliegenden Falle) die Lage der Polarisationsebenen für die zu erwartende Doppelbrechung im voraus angeben kann, orientiert man für deren Nachweis passend die Polarisatoren von vornherein in der genannten vorteilhaftesten Weise. Um die Doppelbrechung zu messen, wendet man eine Vorrichtung an, die selbst Verzögerungen von in meßbarer Weise veränderlicher Größe hervorzubringen vermag, z. B. einen Keil aus einem doppelbrechenden Kristall, der, in den Lichtweg gebracht, zwei normal zueinander polarisierte Wellen mit gegenseitigen Verzögerungen liefert, die mit dem Abstand von der Keilkante proportional sind. Mit einer solchen Vorrichtung kann man die unbekannte Doppelbrechung aufheben, kompensieren (daher der Name Kompensator), und da man die kompensierende Verzögerung kennt, durch sie die kompensierte, ihr entgegengesetzt gleiche messen.

Auch die Aenderung der Geschwindigkeiten der einzelnen Wellen durch das Feld (auf deren Differenz nach obigem die Doppelbrechung beruht) sind der Messung zugänglich. Man läßt hierzu passend eine Lichtwelle zum Teil durch den im Felde befindlichen, der Untersuchung zu unterwerfenden Körper gehen, zum Teil durch einen gleichen, außerhalb des Feldes befindlichen, und bringt beide Teile zur Interferenz (vgl. den Artikel „Interferenz des Lichtes"). Bei geeigneter Anordnung erhält man dann ein System heller und dunkler Streifen, die ihren Ort ändern, wenn die Lichtgeschwindigkeit sich in einem der bezw. beiden Körpern ändert, die sich also verschieben, wenn das Feld erregt oder ausgeschaltet wird. Indem man das zur Interferenz kommende Licht durch einen Nicol gehen läßt, kann man die parallel und die normal zum Feld schwingende Komponente je für sich der Untersuchung unterwerfen.

1e) Direkte und indirekte Wirkungen. Die Deutung der Beobachtungen über elektrooptische Vorgänge wird durch einen Umstand kompliziert, der in der Magnetooptik ganz außer Betracht bleiben kann. Nach S. 470 entstehen auf einem jeden in ein elektrisches Feld gebrachten Körper Ladungen, und diese üben aufeinander Kräfte aus. Ein einfacher Fall ist der einer Platte in einem Kondensator, über den S. 470 gesprochen ist. Bei ihr liegen die Ladungen nur auf den beiden Grundflächen, sie haben entgegengesetztes Vorzeichen und gleiche Größe. Sie ziehen einander an und wirken somit auf die Platte im Sinne eines auf deren Grundflächen ausgeübten normalen Druckes, der sich nicht ändert, wenn die Ladungen ihr Vorzeichen wechseln. Ein solcher mechanisch ausgeübter Druck macht nun gleichfalls die beobachtete Platte doppeltbrechend und zwar optisch einachsig mit der Achse parallel den Kraftlinien des Feldes. Diese Wirkung, die also auch im Felde auftritt, kann man kaum als eine spezifisch elektrooptische bezeichnen, denn das Feld bewirkt dabei zunächst eine Druckkraft, und erst diese wirkt optisch; allenfalls kann man sie als einen indirekten elektrooptischen Effekt bezeichnen. Käme die ganze Wirkung des Feldes auf diese Weise zustande, so hätte die ganze Erscheinung relativ geringes Interesse. Es ist daher die Entscheidung von Wichtigkeit, ob die Beobachtungen sich vollständig durch die genannten Drucke (wie man wohl sagt „durch Elektrostriktion") erklären.

Die Frage vereinfacht sich beträchtlich im Falle von Flüssigkeiten, die in das Feld gebracht werden. Hier entstehen durch Feldwirkung nicht derartige Einzeldrucke in einer bestimmten Richtung, sondern es entsteht eine allseitig gleiche Kompression, die keine Doppelbrechung, sondern nur eine für alle Richtungen in gleicher Weise geänderte Geschwindigkeit ergibt. Daraus folgt, daß, wenn Flüssigkeiten im elektrischen Felde doppeltbrechend werden, dieser Effekt nicht durch mechanischen Druck vermittelt (indirekt) ist, sondern notwendig eine eigenartige (direkte) elektrooptische Wirkung darstellt.

2. Elektrooptische Effekte an isotropen Körpern. **2a)** Erste Beobachtungen an Flüssigkeiten. Das Fundamentalgesetz der elektrischen Doppelbrechung. Eine elektrische Doppelbrechung in Flüssigkeiten ist von J. Kerr (1875) entdeckt und auch lange Zeit hindurch zum Gegenstand der Untersuchung gemacht worden. Die ursprünglich benutzte Anordnung war die, daß in eine Flüssigkeitszelle die kugelförmigen Konduktoren einer Elektrisiermaschine oder eines Funkeninduktors eingetaucht und einander bis auf einige Millimeter genähert wurden. Licht einer Lampe durchsetzte die Flüssigkeit senkrecht zur Verbindungslinie der Konduktoren und wurde durch vor und hinter der Zelle aufgestellte Nicols, deren Polarisationsebenen um $\pm 45°$ gegen die bezügliche Verbindungslinie geneigt waren, ausgelöscht. Bei Erregung des Feldes trat zwischen den Konduktoren eine Aufhellung ein, die auf eine elektrisch erregte Doppelbrechung hinwies.

Die ersten Untersuchungen hatten wesentlich qualitativen Charakter; sie betrafen die Fragen, welche Flüssigkeiten überhaupt die Doppelbrechung aufweisen, und welchen Sinn, sowie welche Größenordnung dieselbe

Digitized by Google

bei jeder einzelnen besitzt. In bezug auf den Sinn der Doppelbrechung sei erwähnt, daß man bei einachsigen Kristallen eine positive und eine negative Doppelbrechung unterscheidet, je nachdem die ordentliche oder die außerordentliche Welle in denselben die größere Geschwindigkeit besitzt. Die Beobachtungen Kerrs ergaben, daß beide Arten der elektrischen Doppelbrechung in sehr verschiedenen Stärken bei Flüssigkeiten auftreten, und daß bezüglich des Sinnes und der Größe eine unverkennbare Beziehung zur chemischen Konstitution stattfindet.

Die oben geschilderte, von Kerr zuerst benutzte Anordnung hat den Uebelstand, daß sie mit einem inhomogenen Feld operiert und demnach zu eigentlichen quantitativen Bestimmungen nicht brauchbar ist. Kerr selbst hat sich später der Einrichtung bedient, den Zwischenraum zwischen zwei Kondensatorplatten mit der zu untersuchenden Flüssigkeit zu erfüllen und Licht parallel den Platten hindurchzuschicken. Hierbei kann man die Einrichtung so treffen, daß der Lichtstrahl die Flüssigkeit in einem merklich homogenen elektrischen Felde durchsetzt.

Durch Beobachtungen, welche in dieser Weise angestellt wurden, gelangte Kerr zu dem Grundgesetz der elektrischen Doppelbrechung, dahin gehend, daß die Verzögerung Δ zwischen den beiden in dem Körper fortschreitenden Wellen proportional ist mit dem Quadrat der Spannungsdifferenz v zwischen den Kondensatorplatten, indirekt mit dem Quadrat von deren Abstand a, direkt der Länge l des im Felde in dem Körper zurückgelegten Weges. Man kann also schreiben

$$\Delta = Bl\, v^2/a^2 = Bl\, E^2$$

wobei $v/a = E$ die zwischen den Kondensatorplatten herrschende Feldstärke bezeichnet, und B die Kerrsche Konstante genannt wird.

Da, wie hier nicht zu beweisen, die Verzögerung Δ sich durch die Brechungsindizes n_1 und n_2 der beiden in dem Körper fortgepflanzten Wellen, den Lichtweg l und die Wellenlänge λ des benutzten Lichtes ausdrückt gemäß

$$\Delta = (n_1 - n_2)\, l/\lambda,$$

so kann man die letzte Formel auch schreiben

$$n_1 - n_2 = B\lambda E^2,$$

dadurch tritt die Rolle der Brechungsindizes an der Erscheinung klar hervor.

Bestimmungen der Kerrkonstante B liegen in großer Menge vor, namentlich für diejenige Flüssigkeit, mit der Kerr zuerst operierte, und die sich durch eine im reinen, staubfreien Zustande gute Isolation gegen Elektrizität empfiehlt, — Schwefelkohlenstoff. Die nicht sehr gute Uebereinstimmung der von verschiedenen Beobachtern erhaltenen Resultate beweist die Schwierigkeit, welche die Messung so geringer Doppelbrechungen bietet. Drückt man E in sogenannten absoluten Einheiten aus, so findet sich für Na-Licht B etwa $= 3.10^{-7}$.

2b) Relative Bestimmungen. Bei Flüssigkeiten mit merklicher elektrischer Leitfähigkeit werden derartige Bestimmungen dadurch noch weiter erschwert, daß spurenweise elektrische Ströme Temperaturänderungen und damit Schlierenbildung in der Flüssigkeit bewirken. Man wendet in diesen Fällen statt statischer elektrischer Felder Wechselfelder an, die bei hinreichend schnellem Wechsel diese Ströme nicht zur Ausbildung gelangen lassen. Für die entsprechende Doppelbrechung ist dann der Mittelwert von E^2 maßgebend. Da dieser aber aus den Daten des elektrischen Apparates schwer zu berechnen ist, so benutzt man vorteilhaft zu seiner Bestimmung eben die elektrische Doppelbrechung, die durch das bezügliche Feld in einer gut isolierenden Flüssigkeit entsteht, deren Kerrkonstante auf statischem Wege also bestimmbar ist, oder, anders ausgedrückt, man beobachtet das Verhältnis der Kerrkonstante der untersuchten Flüssigkeit zu derjenigen der Normalsubstanz. Auf diese Weise sind die bei weitem meisten Messungen über elektrische Doppelbrechung ausgeführt worden. Für diese Normalflüssigkeit wird gern Schwefelkohlenstoff benutzt.

Des Coudres (1893) hat eine Methode angegeben, wobei die elektrische Doppelbrechung in der untersuchten Substanz direkt dadurch gemessen wird, daß man sie mit einer meßbar veränderlichen elektrischen Doppelbrechung in einer Normalsubstanz kompensiert (s. S. 472). Nach dieser Methode sind von W. Schmidt (1901) und neuerdings von Leiser und Lippmann (1911) sehr viele Flüssigkeiten untersucht worden, zum Teil zur weiteren Aufklärung der Beziehungen der elektrischen Doppelbrechung zu der chemischen Konstitution, über die sich interessante Erkenntnisse haben gewinnen lassen.

Im Laufe der Zeit sind die optischen Hilfsmittel derart an Empfindlichkeit gesteigert worden, daß Leiser (1911) sogar an einer Reihe von Dämpfen die elektrische Doppelbrechung hat nachweisen können; sie fand sich bei ihnen proportional mit dem Druck. Die Gase Sauerstoff, Stickstoff, Stickoxyd, Kohlenoxyd ließen auch bei zwei Atmosphären Druck eine Doppelbrechung im elektrischen Felde nicht erkennen.

Ob merkwürdige Beobachtungen von Zeeman (1912) über elektrische Doppel-

Digitized by Google

brechung in Salmiaknebel den vorstehend besprochenen Erscheinungen direkt zuzuordnen sind oder zum Teil auf Beugung beruhen, ist noch nicht zu entscheiden.

Was die Abhängigkeit der elektrischen Doppelbrechung von der Farbe angeht, so haben die Beobachtungen an merklich durchsichtigen Flüssigkeiten übereinstimmend das Resultat ergeben, daß die Doppelbrechung von dem roten nach dem violetten Ende des Spektrums hin zunimmt.

2c) Beobachtungen an festen Körpern. Beobachtungen über elektrische Doppelbrechung in isotropen festen Körpern sind bereits sehr frühzeitig angestellt, — die ersten Kerrschen Versuche (1875) bezogen sich auf dergleichen, insbesondere auf Glas. Aber es ist einigermaßen zweifelhaft, ob die bei ihnen wahrgenommenen Doppelbrechungen nicht zum größten Teil auf Spannungen infolge von Temperaturänderungen beruhten. Die Verhältnisse wurden auch nur zum Teil geklärt, als Kerr bei festen Körpern gleichfalls zu der Benutzung homogener elektrischer Felder, d. h. zwischen Kondensatorplatten eingelegter Glasplatten überging, da bei festen Körpern die elektrische Doppelbrechung jederzeit einen sekundären, auf Elektrostriktion beruhenden Anteil enthält. Kerr hat versucht, sich über diesen Anteil klar zu werden; in größerem Umfang hat dies Tauern (1910) durchgeführt. Hierbei hat sich gezeigt, daß die sekundäre Wirkung sehr beträchtlich ist, gelegentlich im entgegengesetzten Sinne stattfindet, wie die primäre, und letztere fast zu verdecken vermag.

2d) Beobachtungen über absolute Geschwindigkeitsänderungen im Feld. Die Beobachtungen über elektrische Doppelbrechung betreffen eine Erscheinung, welche die Differenz zweier elementarer Wirkungen des Feldes darstellt; denn nach S. 478 entsteht die elektrische Doppelbrechung dadurch, daß die parallel und die normal zum Felde stattfindenden Schwingungen verschiedene Fortpflanzungsgeschwindigkeiten annehmen. Man erhält einen tieferen Einblick in den Vorgang, wenn man diese Einzelgeschwindigkeiten (oder die ihnen entsprechenden Brechungsindizes) für sich untersucht.

Diese Aufgabe, die zuerst Quincke (1883) und Kerr (1894) in Angriff genommen haben, bietet noch erheblich größere Schwierigkeiten, als die Messung der Doppelbrechung; selbst wenn man sich auf die Untersuchung von Flüssigkeiten beschränkt, die durch bloße Temperaturänderung nicht doppeltbrechend wirken, entstehen hier Fehlerquellen durch Stromwärme, da die absoluten Geschwindigkeiten oder Brechungsindizes sich stark mit der Temperatur ändern. In der Tat sind auch die von den genannten Forschern erhaltenen Resultate nicht sehr sicher.

Die ersten zuverlässigen Resultate erhielt Aeckerlein (1906) bei Anwendung von Wechselfeldern mit sehr schnellen Wechseln und einer Lichtquelle, die immer nur im Moment stärksten Feldes in Aktion trat. Er fand bei Nitrobenzol und -toluol, zwei Flüssigkeiten mit besonders großer Doppelbrechung, daß die senkrecht zu den Kraftlinien des Feldes polarisierten Schwingungen durch das Feld verzögert, die ihnen parallel polarisierten um etwa den halben Betrag beschleunigt waren.

Dieses Ergebnis enthält noch eine sekundäre Wirkung in sich, denn wenn auch eine Flüssigkeit in einem Felde keinen einseitigen Druck erfährt, so kommt doch ein allseitiger zustande, und dieser bewirkt zwar keine Doppelbrechung, aber doch eine Veränderung der Lichtgeschwindigkeit und somit des Brechungsindex. Das geschilderte Resultat, dem nach dem im Eingang dieses Abschnittes Gesagten eine große theoretische Bedeutung zukommen würde, ist also nicht völlig sicher gestellt.

2e) Beobachtungen über die Trägheit elektrooptischer Effekte. Eine ähnliche Bedeutung besitzt die Entscheidung der Frage, ob die elektrooptischen Effekte augenblicklich bei Erregung des Feldes eintreten und augenblicklich mit dessen Aufhebung verschwinden, oder ob in beiden Hinsichten Verzögerungen stattfinden. Die vorliegenden Beobachtungen beziehen sich auf den letzten Teil der Frage und benutzen die Methode, den das Feld erzeugenden Kondensator in einem Funken zu entladen, der seinerseits als Lichtquelle für die Beobachtung des elektrooptischen Effektes dient. Indem man das von ihm ausgehende Licht auf längerem oder kürzerem Umwege in den zwischen den Kondensatorplatten befindlichen Körper leitet, kann man die Beobachtung in längeren oder kürzeren Zeiträumen nach dem Verschwinden des Feldes anstellen, insbesondere feststellen, wie lange Zeit nach dem Verschwinden des Feldes auch die elektrische Doppelbrechung verschwindet. Diese schöne von Abraham und Lemoine (1899) erdachte und erstmalig angewandte Methode, die meßbare Verzögerungen von äußerster Kleinheit hervorzubringen gestattet, ist indessen in Wirklichkeit nicht so direkt entscheidend, als vorstehend dargestellt, einmal, weil das Feld selbst nicht mit Bildung des Funkens augenblicklich verschwindet, sondern in Schwingungen allmählich, wenngleich sehr schnell, abklingt, sodann, weil die Lichtemission des Funkens ähnlich kompliziert verläuft.

Daher bedurfte es der Verbindung von theo-

Digitized by Google

retischer Ueberlegung bezüglich dieser Vorgänge mit der Beobachtung, die von James (1904) und von Baetge (1907) durchgeführt ist, um die geschilderte Methode vollständig auszunutzen. Das Resultat dieser Untersuchungen ging dahin, daß die Messungen mit einem völligen Zusammenfallen des Verschwindens der Doppelbrechung mit dem Verschwinden des Feldes vereinbar sind, und jedenfalls 10^{-8} Sekunden nach der Entladung der Kondensatorplatten eine Doppelbrechung nicht mehr vorhanden ist.

3. Elektrooptische Effekte an azentrischen Kristallen. Die bisher dargestellten Untersuchungen bezogen sich ausschließlich auf isotrope Körper. Erscheinungen von wesentlich verschiedenem Charakter sind bei einer Reihe von Kristallen beobachtet, deren Form kein Symmetriezentrum besitzt, derart, daß nicht jedem Formelement ein gleichartiges gegenüberliegt. Das reguläre Tetraeder bietet das einfachste Beipsiel einer derartigen Kristallform.

An Kristallen dieser Symmetrie hatten P. und J. Curie (1882) bei Einwirkung eines Feldes Deformationen entdeckt, die sich nicht (wie die an isotropen Körpern nach S. 479 auftretenden) auf Drucke zurückführen lassen, die durch Wechselwirkungen zwischen elektrischen Ladungen entstehen, sondern ganz anderen Charakter haben. Eine Platte aus einem solchen Kristall in einen Kondensator eingelegt wird bei einer Ladung des Kondensators, also bei einer Richtung des Feldes komprimiert, bei der entgegengesetzten aber dilatiert. Es lag nahe, zu vermuten, daß in der Platte eine elektrische Doppelbrechung resp., wenn eine natürliche Doppelbrechung vorhanden war, eine Aenderung dieser entstehen möchte, die bei einer Umkehrung der Feldrichtung gleichfalls ihren Sinn änderte. Beobachtungen, die Röntgen und Kundt (1883) unabhängig von einander angestellt haben, bestätigten diese Erwartung. Es gilt demgemäß hier für die elektrische Doppelbrechung (falls keine natürliche vorliegt) statt der Kerrschen Formel von S. 480 die andere

$$\Delta = B'lE,$$

welche die Umkehrung von Δ mit dem Vorzeichen von E ausdrückt.

Auch hier entsteht nun die Frage, ob der beobachtete elektrooptische Effekt rein sekundär ist, nämlich nur auf jener eigenartigen Elektrostriktion beruht, oder ob er eine direkte optische Wirkung des elektrischen Feldes enthält. Die Beantwortung dieser Frage ist sehr viel schwieriger, als die der analogen bei isotropen Körpern, weil die bezügliche Elektrostriktion zu klein ist, um direkt messend verfolgt zu werden, und daher aus anderen Beobachtungen auf ziemlichen Umwegen geschlossen werden muß, sodann, weil auch die optische Wirkung einer Spannung bei Kristallen sehr komplizierten Gesetzen folgt. Pockels hat (1894) in einer umfänglichen theoretischen und experimentellen Untersuchung für einige azentrische Kristalle (insbesondere Natriumchlorat und Quarz) den Nachweis erbracht, daß bei derartigen Körpern das elektrische Feld nicht nur durch Vermittelung der Elektrostriktion, sondern auch direkt die optischen Eigenschaften beeinflußt.

4. Theoretische Ueberlegungen. 4a) Allgemeine Gesichtspunkte. Um die Versuche einer Erklärung und quantitativen Theorie der elektrooptischen Effekte zu verstehen, hat man sich der Grundlagen der modernen theoretischen Optik zu erinnern, wie sie in dem Artikel über Magnetooptik skizziert sind. Hiernach besteht eine Lichtwelle im leeren Raum ausschließlich in Schwingungen elektrischer und magnetischer Kraft, die von einer Lichtquelle, d. h. von den in ihr schwingenden Elektrizitäten aus sich fortpflanzen. Tritt eine solche Welle in einen Körper ein, so findet sie dort Elektronen, d. h. elektrische Atome, die an die ponderabeln Moleküle gebunden sind und dort infolge der auf sie wirkenden Kräfte (wie ein Pendel) Eigenschwingungen auszuführen vermögen.

Die Lichtwelle mit den in ihr stattfindenden Schwingungen elektrischer Kraft setzt diese Elektronen in Bewegung, und zwar um so energischer, je näher die Schwingungsfrequenz der Lichtwelle der Eigenfrequenz der Elektronen liegt; die Elektronenschwingungen aber unterliegen dämpfenden Kräften um so stärker, je energischer sie selbst geschehen. So werden in der Lichtwelle diejenigen Frequenzen am stärksten absorbiert, die der Eigenfrequenz der Elektronen am nächsten liegen; fällt weißes Licht ein und wird das aus dem Körper austretende Licht spektral zerlegt, so zeigt sich an der Stelle des Spektrums, welche der Eigenfrequenz entspricht, ein Absorptionsstreifen.

Dieser Absorptionsvorgang ist zugleich die Ursache der Veränderlichkeit der Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichtes in dem ponderabeln Körper, die man gewöhnlich in der Farbenabhängigkeit des Brechungsindex ausdrückt, und deren Verlauf in der Umgebung eines Absorptionsstreifens auf S. 708 im Bd. VI geschildert wird.

Nach dem Gesagten wird auch eine elektrische Doppelbrechung in letzter Instanz auf einer Veränderung der Absorptionsverhältnisse der Körper im elektrischen Feld beruhen müssen, derart, daß die parallel und die normal zum Feld stattfindenden Schwingungen verschiedenartige Absorptionen erhalten. Es ist in dem Artikel über Magneto-

Digitized by Google

optik auseinandergesetzt worden, daß man die Veränderungen der Absorptionen im Magnetfeld entweder direkt oder aber indirekt durch Untersuchung der ihnen entsprechenden Emissionen hat beobachten können, und daß dadurch ein wichtiges Hilfsmittel für die Deutung der meisten magnetooptischen Effekte gegeben worden ist. Derartige Beobachtungen fehlen, wie schon S. 471 bemerkt, bislang im Gebiete der Elektrooptik und damit fehlt auch ein ähnlich klarer Einblick in den Mechanismus des Vorganges, wie wir ihn im Gebiete der Magnetooptik besitzen.

4b) Spezielle Hypothesen. Zwei verschiedene Vorstellungen sind theoretisch verfolgt worden. Die ältere (Voigt 1901) knüpft direkt an die Vorstellungen an, die sich in der Magnetooptik fruchtbar erwiesen haben, und denkt durch das elektrische Feld die Gleichgewichtslage der Elektronen im Molekül verschoben. Die mathematische Verfolgung dieses Gedankens ergibt, daß hierdurch auch die Eigenfrequenzen der Elektronen geändert werden können, und zwar für die Schwingungen parallel zu dem äußeren elektrischen Feld um einen anderen Betrag, als für diejenigen normal zum Felde. Diese Theorie, die für Kristalle ebenso anwendbar ist, wie für isotrope Körper, führt also wesentlich auf eine Verschiebung der Absorptionsstreifen als Ursache der elektrooptischen Effekte.

Die neuere Vorstellung (Langevin 1910) geht dahin, daß die Moleküle der Körper von Natur aeolotrop resp. kristallinisch sind und sich bei Einwirkung eines elektrischen (oder magnetischen) Feldes mit einer ausgezeichneten Richtung dem Felde parallel zu stellen suchen, aber wegen der Wärmebewegung nicht zu einer Gleichgewichtslage in dieser Orientierung gelangen, sondern nur zu einer von der regellosen Verteilung je nach der Stärke des Feldes mehr oder weniger abweichenden.

Die kristallinischen Moleküle würden bei einer ganz geordneten Orientierung einen Kristall darstellen mit drei Hauptspektren, deren jedes seine eigenen Absorptionsstreifen besitzt. Das Medium außerhalb des Feldes muß dann wegen der regellosen Orientierung der Moleküle alle drei Gattungen von Absorptionen (in beiläufig auf ein Drittel verringerter Stärke) gleichzeitig besitzen. Bei Einwirkung des Feldes wird eine bestimmte Gattung von Orientierungen bevorzugt, und die diesen entsprechenden Absorptionen werden sonach gegenüber den übrigen verstärkt werden. Die zweite Theorie führt somit im Gegensatz zu der ersten die elektrooptischen Effekte im wesentlichen auf eine Veränderung der relativen Intensität der Absorptionsstreifen ohne Verschiebung zurück.

Sie hat einen bemerkenswerten Erfolg zu verzeichnen, indem sie die Beobachtungen Aeckerleins über die Beträge der absoluten Verzögerungen von S. 474 erklärt. Diese Beobachtungen beziehen sich auf Flüssigkeiten, und man hat hier von vornherein keine Veranlassung, gegen die Grundannahme der Orientierung der Moleküle im Felde Bedenken zu erheben. Anders liegt die Sache bei festen Körpern, insbesondere bei Kristallen, wo elektrooptische Effekte unter Umständen beobachtet sind, unter denen Drehungen der Moleküle nach den Symmetrieverhältnissen ausgeschlossen sind. Hier muß also wohl ein anderer Vorgang wirksam werden.

Literatur. *E. Néculcea, Le Phénomène de Kerr. Scientia No. 16. Paris 1902.* — *W. Voigt, Magneto- und Elektrooptik. Leipzig 1908.*

W. Voigt.

Elektroosmose

siehe den Artikel „Strömungsströme".

Elektrostatische Messungen.

1. Allgemeines. 2. Elektrostatische Meßinstrumente: a) Prinzip und allgemeine Einrichtung der Elektrometer. b) Die einzelnen Instrumente: 1) Absolute Elektrometer. 2) Schachtelelektrometer: α) Quadrantelektrometer. β) Zylinder-Quadrantelektrometer. γ) Binantenelektrometer. 3) Elektrometer mit empirischer Skala: α) Elektrostatische Voltmeter. β) Blättchen- und Saitenelektrometer. 3. Messung von Potentialdifferenzen: a) Potentialdifferenzen zwischen Leitern. b) Luftpotentiale. 4. Messung von Elektrizitätsmengen. 5. Messung von Kapazitäten: a) Vergleichung durch Ladungsteilung. b) Vergleichung durch Gegenstellen. c) Vergleichung in der Brücke. 6. Messung von Dielektrizitätskonstanten: a) Bestimmung mit dem Kondensator. b) Bestimmung durch Kraftwirkungen.

1. Allgemeines. Die elektrostatischen Messungen beschäftigen sich mit der quantitativen Untersuchung der Größen, welche das elektrische Feld (vgl. den Artikel „Elektrisches Feld") ruhender Elektrizitätsmengen bestimmen; insbesondere mit der Messung der Potentialdifferenz, der Elektrizitätsmenge, der Kapazität und der Dielektrizitätskonstanten. Und zwar bedient man sich dabei einer besonderen Art von Meßinstrumenten, der Elektrometer, welche auf der Tatsache beruhen, daß elektrisch geladene Körper mechanische Kräfte aufeinander ausüben.

Digitized by Google

2. Elektrostatische Meßinstrumente. 2a) Prinzip und allgemeine Einrichtung der Elektrometer. Im allgemeinen Falle ist die Anordnung eines Elektrometers die folgende (Fig. 1). L_1, L_2, L_3 sind drei

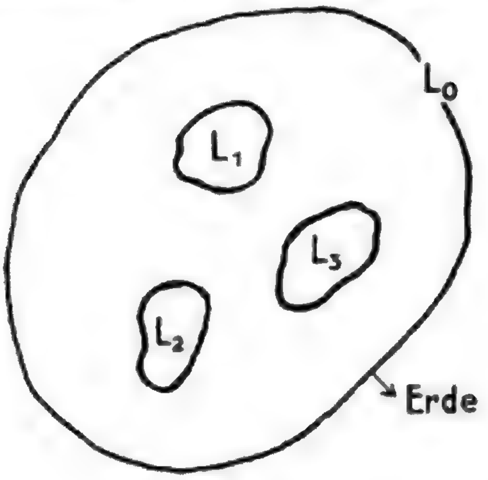


Fig. 1.

isolierte Metallkörper, die bis auf kleine, zur Beobachtung nötige Glasfenster, vollkommen von einem Metallmantel L_0 umgeben sind. Das Zwischenmedium ist in der Regel Luft. Die zur Befestigung der Metallkörper innerhalb der Hülle nötigen Isolatoren mögen einen verhältnismäßig kleinen Raum des Zwischenmediums einnehmen. L_0 wird stets in leitender Verbindung mit der Erde gehalten, hat also deren Potential, das, weil für uns nur Potentialdifferenzen Bedeutung haben, willkürlich gleich Null gesetzt wird. Den Leitern L_1, L_2, L_3 seien die Potentialdifferenzen (Gleichspannungen) v_1, v_2, v_3 gegen L_0, mithin gegen Erde, erteilt. Dann befinden sich auf den Oberflächen von L_1, L_2, L_3 und auf der Innenfläche von L_0 die Ladungen:

$$\left.\begin{aligned} e_1 &= K_{11}v_1 + K_{12}v_2 + K_{13}v_3 \\ e_2 &= K_{21}v_1 + K_{22}v_2 + K_{23}v_3 \\ e_3 &= K_{31}v_1 + K_{32}v_2 + K_{33}v_3 \\ e_0 &= K_{01}v_1 + K_{02}v_2 + K_{03}v_3, \end{aligned}\right\} \quad . \; . \; 1)$$

während auf der Außenfläche von L_0 die Ladung gleich Null ist.

In den Gleichungen (1) heißen K_{11}, K_{22}, K_{33} die Kapazitäten von L_1, L_2, L_3 im Leitersystem. Sind z. B. alle Leiter bis auf L_1 geerdet, ist also

$$v_2 = v_3 = 0,$$

so wird

$$e_1 = K_{11}\,v_1.$$

Wird, wie wir es im folgenden tun wollen, die Potentialdifferenz v_1 in Volt, die Kapazität K_{11} in Farad angegeben, so erhält man die Elektrizitätsmenge e_1 in Coulomb. Die K_{11}, K_{22}, K_{33} sind stets positive Größen.

Die K_{01}, K_{02}, K_{03}, K_{12}... heißen Induktionskoeffizienten der Leiter gegeneinander. Sie werden ebenfalls in Farad angegeben, sind aber im Gegensatz zu den Kapazitäten stets negative Größen. Es ist immer

$$K_{\alpha\beta} = K_{\beta\alpha}. \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; 2)$$

Die Werte der Kapazitäten und Induktionskoeffizienten sind durch die geometrische Lage der Leiter zueinander bestimmt. Aendert man diese, so ändern sich auch die Werte der K und damit bei konstant gehaltenen Spannungen v die auf den Leitern befindlichen Elektrizitätsmengen e.

Wir wenden uns jetzt den mechanischen Kräften zu, welche zwischen den auf bestimmten Potentialen befindlichen Leitern wirken.

Das Grundgesetz für die Wirkung ist das Coulombsche Gesetz, welches besagt, daß zwei in ein homogenes Dielektrikum in der Entfernung r cm voneinander eingebettete, punktförmige Elektrizitätsmengen e_1 und e_2 aufeinander wirken mit einer Kraft, die proportional ist $e_1 e_2$ und indirekt proportional r^2, also mit einer Kraft

$$k = \left(\frac{c^2}{\varepsilon}\right)\frac{e_1 e_2}{r^2}. \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; 3)$$

Die in der Proportionalitätskonstanten $\left(\frac{c^2}{\varepsilon}\right)$ enthaltene Größe ε nennt man die Dielektrizitätskonstante des die Elektrizitätsmengen umgebenden isotropen Isolators. Für Luft ist mit meist genügender Annäherung $\varepsilon = 1$ (S. 498). Wählt man, wie wir es getan haben, als Einheit für die Elektrizitätsmenge die „Amperesekunde" oder das „Coulomb", so ist $c = 3.10^9$ zu setzen, wenn man k in Dynen erhalten will.

Ein positiver Wert für k bedeutet nach der Formel eine abstoßende Kraft zwischen Elektrizitätsmengen gleichen Vorzeichens, ein negativer Wert für k eine anziehende Kraft zwischen Elektrizitätsmengen entgegengesetzten Vorzeichens.

Das Coulombsche Gesetz gilt für die Wechselwirkung zwischen zwei punktförmigen Elektrizitätsmengen. Bei den elektrostatischen Meßinstrumenten handelt es sich aber stets um Elektrizitätsmengen, die auf mehr oder weniger ausgedehnten Leitern verteilt sind. Dann besteht die Gleichung (3) zwischen je zwei unendlich kleinen Teilchen, in welche man sich die Ladung auf den Leitern zerlegt denken kann, und es ist Aufgabe der theoretischen Elektrostatik, die ponderomotorischen Kräfte zwischen den geladenen Leitern zu berechnen.

Dies gelingt nur bei den sogenannten absoluten Elektrometern. Bei diesen Instrumenten wird in jedem Falle durch den Beobachter eine den elektrostatischen Kräften entgegenwirkende mechanische Kraft

Digitized by Google

so abgeglichen, daß der bewegliche Leiter in eine ganz bestimmte Lage zu den festen Leitern kommt. Für diese eine Lage ist bei den absoluten Elektrometern, die also als Nullinstrumente anzusehen sind, die mathematische Beziehung zwischen Potentialdifferenz und ponderomotorischer Kraft zwischen den Leitern bekannt.

Alle übrigen Elektrometer sind in erster Linie Ausschlagsinstrumente. Die durch das Anlegen bestimmter Potentiale an die Leiter auftretenden ponderomotorischen Kräfte zwischen diesen bewirken eine Ablenkung des beweglichen Leiters (z. B. L_2 in Fig. 1) aus der Ruhelage, bis bestimmte der Ablenkung entgegenwirkende mechanische Kräfte (z. B. die Torsion eines Drahtes) ein Gleichgewicht herbeiführen.

Von diesen Instrumenten sind diejenigen als besonders vollkommen hervorzuheben, bei denen es gelungen ist, durch bestimmte Anordnung der Leiter zu erreichen, daß wenigstens für kleine Ablenkungen des beweglichen Leiters eine einfache mathematische Beziehung zwischen Potentialen und Ablenkungen besteht, die in der Regel zwei experimentell bestimmbare Konstante besitzt. Es sind dies die Quadrant- und Binanten-Elektrometer, die wir zusammenfassend als Schachtelelektrometer bezeichnen wollen.

Für alle übrigen Elektrometer besteht eine solche strenggültige Beziehung nicht. Sie sind Instrumente mit empirischer Skala, die durch Eichen auf Potentialdifferenzen Punkt für Punkt ermittelt werden muß.

Ganz einfache Instrumente der letzten Art, die keine Skala besitzen und nur anzeigen, ob Potentialdifferenzen gegen Erde vorhanden sind oder nicht, und die außerdem das Vorzeichen des Potentials zu bestimmen gestatten, nennt man Elektroskope.

Bevor wir zur Besprechung der einzelnen Elektrometer übergehen, wollen wir zwei allen Elektrometern gemeinsame Teile besprechen, die Schutzhüllen und die festen Isolatoren, die die einzelnen Leiter voneinander trennen.

Die Schutzhülle L_0 (Fig. 1), die die Leiter L_1, L_2, L_3 vollkommen umgibt, ist aus zwei Gründen nötig. Erstens schützt sie den beweglichen Teil L_2 des Elektrometers vor Luftströmungen. Dies ist, zumal bei Instrumenten, die die Messung kleiner Potentiale gestatten, deshalb nötig, weil die L_2 ablenkenden Kräfte außerordentlich klein sind. Hochempfindliche Instrumente umgibt man außerdem, um Strahlungs- und Temperatureinflüsse genügend fernzuhalten, mit einem außen mit Stanniol beklebten Pappgehäuse, das nur die zur Ablesung nötigen Ausschnitte besitzt. Zweitens hindert die bis auf kleine Fenster geschlossene Metallhülle störende Influenzwirkungen von und nach außen. Je empfindlicher die Elektrometer und je höher die Spannungen in der Nähe befindlicher Leiter sind, um so mehr muß sich der Schutzmantel einer allseitig geschlossenen Metallhülle nähern.

Handelt es sich nicht um die Messung von konstant gehaltenen Potentialen, sondern von abgetrennten Elektrizitätsmengen, so müssen auch, wenn Fehler durch Influenzierung ausgeschlossen sein sollen, die Zuleitungen zum Elektrometer durch geerdete Metallhüllen geschützt werden.

Die festen, die einzelnen Leiter der Elektrometer voneinander trennenden Isolatoren, von denen in erster Linie Bernstein, Schellack, Hartgummi, Quarzglas in Frage kommen, müssen so angeordnet werden, daß etwaige allmählich auf dieselben übergehenden Ladungen nicht auf den beweglichen Leiter L_2 wirken können. Eine nach dieser Richtung fehlerhafte Konstruktion wird daran erkannt, daß das Elektrometer beim Anlegen konstanter Potentialdifferenzen statt eines konstanten Ausschlags einen mit der Zeit allmählich veränderlichen Ausschlag zeigt.

Solange man mit konstant gehaltenen Potentialdifferenzen arbeitet, ist eine besonders hohe Isolation der einzelnen Leiter nicht erforderlich. Größte Sorgfalt ist aber darauf zu verwenden, wenn man mit abgetrennten Elektrizitätsmengen zu tun hat. Durch Feuchtigkeit bedingte Oberflächenleitung auf den Isolatoren wird dann zweckmäßig durch Einführen von metallischem Natrium in das Elektrometergehäuse beseitigt. Auch die durch die Ionisation der Luft bedingten Ladungsverluste sind eventuell zu berücksichtigen.

Im folgenden betrachten wir zunächst die Elektrometer als Instrumente zur Messung von konstant gehaltenen Potentialdifferenzen.

2b) Die einzelnen Instrumente. 1) Absolute Elektrometer. Steht eine ebene Metallplatte von der Grundfläche f qcm in Luft einer ebensolchen von größerer Grundfläche im Abstand a cm parallel gegenüber, und werden die beiden Platten auf den Potentialen V_1 und V_2 Volt gehalten, so wird die kleinere Platte von der größeren mit einer Kraft

$$k = \frac{1}{8\pi}\frac{f}{a^2}\left(\frac{V_1-V_2}{300}\right)^2 \text{ (Dynen)} \quad . \; . \; . \; 4)$$

angezogen. Diese Formel gilt mit genügender Genauigkeit nur dann, wenn a gegen die Ausdehnung von f verschwindend klein ist. Ergänzt man jedoch nach dem Vorgange von W. Thomson (Lord Kelvin) die kleinere

Digitized by Google

Platte durch einen in derselben Ebene liegenden und auf demselben Potential befindlichen Schutzring, durch welchen die Platte gerade ohne Reibung hindurchgeht, etwa zur Größe der anderen Platte, so gilt die Formel für erheblich größere Werte von a. Sind speziell die Platten kreisförmig (Fig. 2),

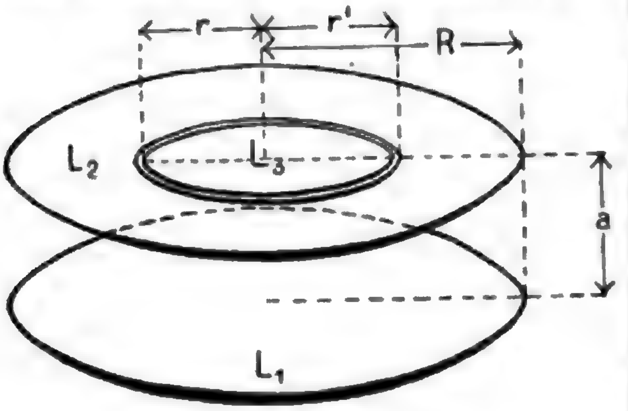


Fig. 2.

so darf nach **Thomson** ohne Schaden für die Gültigkeit der Formel a bis zu $\frac{r}{2}$ wachsen, wenn außerdem r höchstens $^3/_4$ R ist. Dabei ist nach **Maxwell** nicht einfach $f = r^2\pi$ zu setzen, sondern

$$f = \frac{\pi}{2}\left[r^2 + r'^2 - (r'-r)\frac{r'+r}{1+4{,}5\,\frac{a}{r'-r}}\right] \qquad 5)$$

Bei der **Kirchhoffschen Wage** (Fig. 3) sind die Platten horizontal gestellt. Das

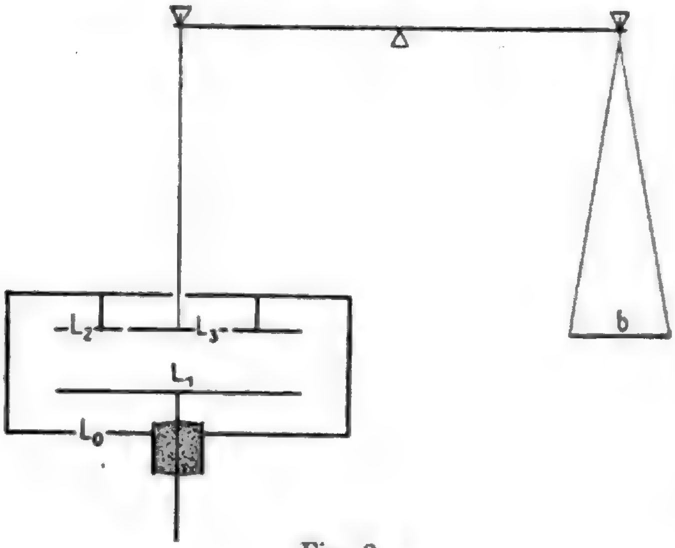


Fig. 3.

geerdete L_3 bildet die eine Schale einer gleicharmigen Wage und liegt, wenn der Wagezeiger auf Null steht, in einer Ebene mit dem Schutzring L_2, der mit dem geerdeten Gehäuse L_0 leitend verbunden ist. Ein Anschlag der anderen Wageschale b verhindert, daß sich L_3 der vom Gehäuse isolierten Platte L_1 über diese Lage hinaus nähert. Der Isolator ist in Figur 3, wie auch später, durch Punktierung gekennzeichnet. Die Messung geschieht in folgender Weise. Während L_1 mit L_0 leitend verbunden ist, wird die Wage durch Auflegen von Gewichten auf b so abgeglichen, daß sie gerade nicht mehr umkippt. Dann legt man zwischen L_1 und L_0 die zu messende Spannung V. Muß man dann p g auf die Schale b legen, damit die Wage gerade umzukippen beginnt, so erhält man aus Gleichung (4), wenn man $V_1 - V_2 = V$ (Volt) und $k = 981\,p$ (Dynen) setzt, die gesuchte Spannung in Volt

$$V = 300a\sqrt{\frac{981p8\pi}{f}}. \qquad \ldots 6)$$

Dies Instrument ist geeignet, Potentialdifferenzen von 1000 Volt an aufwärts zu messen. Bei sehr hohen Werten der Spannung zeigen sich jedoch Mängel. Einmal muß man dann, um den Ueberschlag von Funken zu vermeiden, L_3 und L_1 in großem Abstande voneinander anordnen und erhält große Dimensionen des Apparates und verhältnismäßig kleine anziehende Kräfte; sodann wirken bei hohen Spannungen durch stille

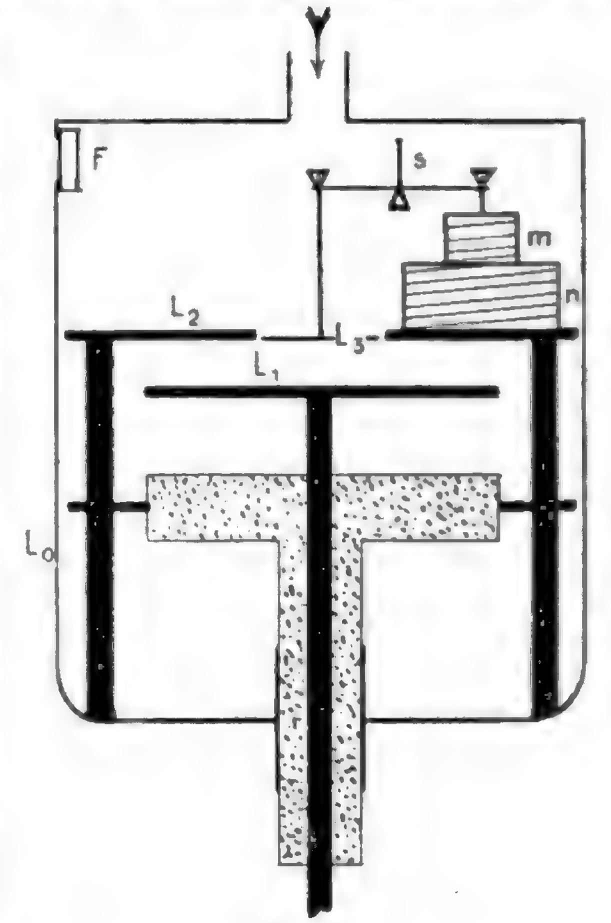


Fig. 4.

Entladung bedingte Luftströmungen störend auf die Messung ein. Beide Uebelstände hat man in neuester Zeit dadurch beseitigt, daß man statt Luft von Atmosphärendruck

Luft von etwa 10 Atmosphären als Zwischenmedium verwendet.

Ein von **Tschernyscheff** angegebenes **Instrument** ist in Figur 4 skizziert. L_1 ist gegen das geerdete Gehäuse L_0 sorgfältig isoliert. L_2 und L_3 sind mit L_0 leitend verbunden. Die Druckluft tritt von oben in das genügend widerstandsfähige Gehäuse ein. Die rechte Wageschale besteht nach dem Vorgange von **Crémieu** aus einer stromdurchflossenen Spule m, die von einer von demselben Strome (Intensität I) durchflossenen Spule n angezogen wird, und zwar mit einer I^2 proportionalen Kraft k. Es ist also:

$$k = CI^2.$$

Die Proportionalitätskonstante C wird durch Auflegen von Gewichtsstücken auf L_3 bei allseitiger Erdung bestimmt, so daß man bei gemessenem Strom I die Kraft k in Dynen kennt, welche Gleichgewicht an der Wage herstellt. Für V gilt dann Formel (6), wenn man noch die rechte Seite durch $\sqrt{1,005}$ dividiert. Es hat dies seinen Grund in der höheren Dielektrizitätskonstanten der Luft bei einem Druck von 10 Atmosphären (S. 498). Die Nullage der Wage wird durch Beobachtung des Spiegels s durch das Glasfenster F hindurch mit Fernrohr und Skala beurteilt. Bei einem Abstand von nur 2 cm zwischen L_1 und L_3 kann man mit Potentialdifferenzen bis 180000 Volt arbeiten, ohne daß die erwähnten Störungen merklich werden.

Eine Schwierigkeit beim Gebrauch der absoluten Elektrometer besteht darin, den Abstand a zwischen den Platten L_1 und L_3 genügend genau zu messen, besonders wenn a

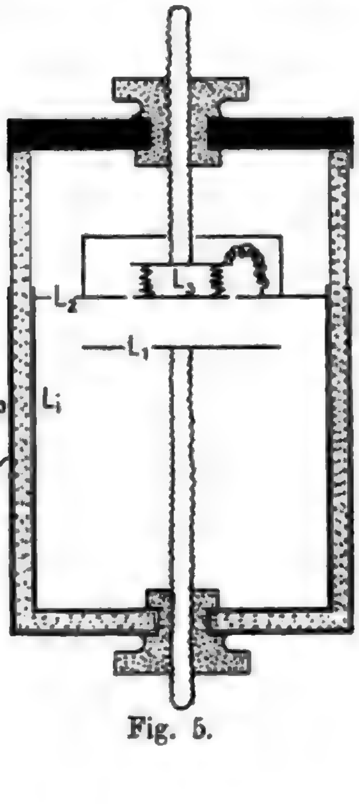


Fig. 5.

verhältnismäßig klein ist. Sie läßt sich bei einem von **W. Thomson** konstruierten **absoluten Elektrometer** umgehen. Dies Instrument, das in seinen wesentlichen Teilen in Figur 5 skizziert ist, unterscheidet sich zunächst von der **Kirchhoffschen** Wage dadurch, daß L_3 nicht die Schale einer Hebelwage, sondern einer Federwage bildet, deren Aufhängepunkt mittels einer im Gehäuse laufenden Mikrometerschraube stets so eingestellt wird, daß die unteren Flächen von L_3 und L_2 eine Ebene bilden. Ein an L_3 befestigter Zeiger und eine mit L_2 festverbundene Marke, die in Figur 5 fortgelassen sind, erleichtern dies. Ist die Einstellung bei allseitiger Erdung gemacht, so muß, wenn bei sonstiger Erdung L_1 auf das Potential V gebracht wird, wegen der Verlängerung der Federn durch die Anziehung zwischen L_1 und L_3, ihr Aufhängepunkt um einen bestimmten Betrag gehoben werden, um L_3 wieder in die richtige Lage zu bringen. Ist die Federwage zuvor bei allseitiger Erdung durch Auflegen von bekannten Gewichten auf L_3 in Dynen geeicht, so erhält man V nach Formel (6).

Um nun die Schwierigkeit, a genau zu messen, zu umgehen, wird nach W. **Thomson** folgendermaßen verfahren. L_2 und L_3 werden dauernd mit der inneren Belegung L_i einer Leidener Flasche verbunden. L_i wird auf einem konstanten, nicht zu kleinen Potential V' gehalten, während die äußere Belegung L_0 geerdet ist. Bei geerdetem L_1 und bei einem beliebigen Abstand desselben von L_3 sei die zur Erzielung der Nullstellung notwendige Kraft k = 981 . p Dynen. Wird dann L_1 auf das zu messende Potential V gebracht, und hat man L_1 um eine Strecke l zu verschieben, um L_3 wieder in die Nullstellung zu bringen, so ist

$$V = l\sqrt{\frac{8\pi k}{f}} \quad \ldots \ldots \quad 7)$$

In dieser Formel kommt der Abstand a nicht mehr vor, sondern nur die sehr genau meßbare Verschiebung l. V' braucht man ebenfalls nicht zu kennen, sondern nur dafür zu sorgen, daß es während der beiden Einstellungen konstant bleibt, was W. **Thomson** mit einem sehr empfindlichen Hilfselektrometer kontrolliert.

Die mit absoluten Elektrometern erreichbare Genauigkeit der Potentialmessung beträgt rund 1%.

Alle elektrostatischen Instrumente, bei denen die anziehende Kraft zwischen den Elektroden dem Quadrat der Potentialdifferenz proportional ist, messen ohne weiteres auch die Effektivwerte von Wechselspannungen. Das gilt also auch für die absoluten Elektrometer. Ihre große Bedeutung

Digitized by Google

für die Elektrotechnik liegt darin, daß man sehr hohe Wechselspannungen bisher nur mit ihrer Hilfe messen kann.

2) Schachtelelektrometer. *a*) Quadrantelektrometer.

Beschreibung. Der wesentliche Teil dieses von W. Thomson angegebenen Instruments ist in Figur 6 schematisch dar-

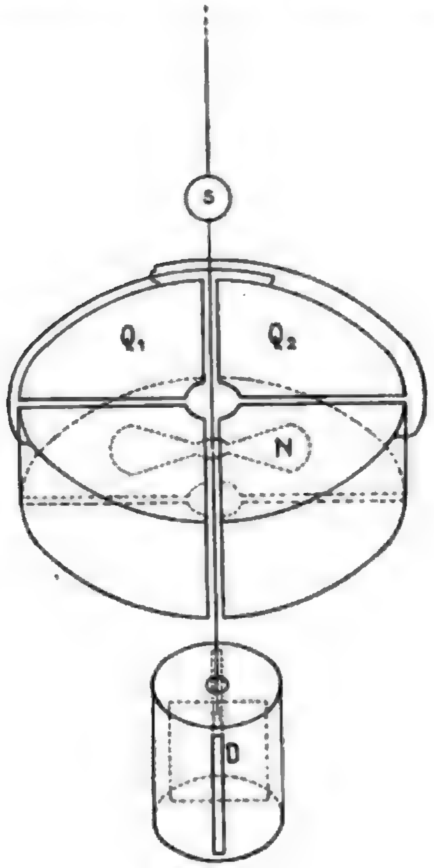


Fig. 6.

gestellt. Vier vom Gehäuse (in Fig. 6 nicht gezeichnet) und gegeneinander isolierte Quadranten sind so zusammengesetzt, daß sie, von den Schlitzen abgesehen, eine runde Schachtel bilden. Je zwei gegenüberliegende Quadranten sind durch Drähte leitend miteinander verbunden und an außen am Gehäuse gelegene isolierte Klemmen geführt. Die beiden Quadrantenpaare, die im folgenden mit Q_1 und Q_2 bezeichnet werden, entsprechen den Leitern L_1 und L_2 in Figur 1, das Gehäuse G dem Leiter L_0. Der bewegliche, L_3 entsprechende Leiter besteht aus einer bisquitförmigen Nadel N aus dünnem Aluminiumblech und einem diese in der Mitte und senkrecht zu ihrer Fläche durchsetzenden Aluminiumdraht, der oben den Ablesespiegel s und unten die Dämpferscheibe D trägt. Das ganze System ist mittels eines dünnen leitenden Fadens, am besten eines Platindrahtes, an einem vom Gehäuse isolierten Torsionskopf so aufgehängt, daß die Nadel innerhalb der Schachtel nahe horizontal liegt und bei Torsion des Aufhängedrahtes in einer horizontalen Ebene schwingt.

Die Dämpferscheibe D, eine rechteckige dünne Aluminiumplatte, befindet sich in einem vom Gehäuse isolierten und mit ihr auf gleichem Potential befindlichen Dämpferkasten, der mit verstellbaren Querwänden versehen ist. Diese Töplersche Luftdämpfung ermöglicht bei geeigneten Abmessungen ein aperiodisches Dämpfen des beweglichen Systems, wobei die Feinregulierung durch Verstellen der Querwände erfolgt. Weniger gut als Luftdämpfungen, die auch in anderen Formen verwandt werden, sind Flüssigkeitsdämpfungen und elektromagnetische Dämpfungen. Bei hochempfindlichen Quadrantelektrometern genügt zur Dämpfung des beweglichen Systems die Luftreibung der Nadel.

Ein bequemes und sicheres Arbeiten mit einem Quadrantelektrometer ist gewährleistet, wenn bestimmte Feinverstellungen an ihm möglich sind. Dazu ist nötig, daß das Gehäuse auf drei im gleichseitigen Dreieck angeordneten Stellschrauben und die Quadrantenschachtel auf ebensolchen, in der Grundplatte des Gehäuses laufenden Schrauben ruht. Ferner muß der Torsionskopf so konstruiert sein, daß die Nadel gegenüber den Quadranten vertikal und horizontal beliebig verstellt werden kann. Das gleiche gilt von dem Kasten der Dämpfung in bezug auf die Dämpferscheibe.

Orientierung. Die Grundplatten des Gehäuses und der Quadrantenschachtel und die Fläche der Nadel werden möglichst horizontal gestellt. Der Torsionskopf wird so gedreht, daß, bei allseitiger Erdung des Elektrometers, die Längsachse der Nadel senkrecht unterhalb eines Schlitzes der oberen Grundfläche der Schachtel liegt. Fernrohr und Skala werden zum Spiegel s so gestellt, daß das Fadenkreuz des Fernrohres etwa mit der Mitte der Skala zusammenfällt. Es wird ferner dafür gesorgt, daß die Drehachse der Aufhängung sowohl zur Schachtel wie zum Dämpferkasten symmetrisch steht. Es hat gewisse Vorteile, wenn man die Nadel möglichst genau in die Mitte der Quadrantenschachtel stellt.

Wären nun Nadel und Quadrantenflächen absolut eben, und wären die Kontaktpotentialdifferenzen der Metalle gleich Null, so dürfte das bewegliche System nicht aus der Ruhelage gebracht werden, wenn man bei sonst geerdeten Elektrometerteilen an die Nadel eine hohe Spannung (etwa 150 Volt) legt. Die Erfahrung hat gezeigt, daß diese Bedingung niemals genau zu erfüllen ist. Infolgedessen tritt im beschriebenen Falle stets ein mehr oder weniger großer Ausschlag der Nadel ein. Für die folgenden Betrach-

Digitized by Google

tungen wird nur vorausgesetzt, daß dieser Ausschlag ein kleiner Bruchteil des durch die Länge der Skala begrenzten Ausschlages ist, damit diese genügend ausgenutzt werden kann. Sind die bestehenden Unsymmetrieen nicht zu erheblich, so genügt eine geringe seitliche Verschiebung der Aufhängung gegen die Schachtel in einer auszuprobierenden Richtung, um dieser Forderung zu genügen.

Allgemeine Elektrometergleichung. Legt man jetzt zwischen Q_1 und das geerdete Gehäuse G die Potentialdifferenz V_1, zwischen Q_2 und G die Potentialdifferenz V_2 und zwischen N und G die Potentialdifferenz V_0 und ist α die beobachtete, auf Winkel reduzierte Ablenkung der Nadel in Skalenteilen, so ist nach Orlich die allgemeine Elektrometergleichung:

$$D\alpha = a_0V_0^2 + a_1V_1^2 + a_2V_2^2 + b_0V_1V_2 + b_1V_0V_1 + b_2V_0V_2 + c_0V_0 + c_1V_1 + c_2V_2 \quad . \; . \quad 7)$$

Darin sind die a, b, c Konstante, zwischen denen mit großer Annäherung die Beziehung gilt:

$$a_1 - a_2 = -b_1 = b_2 \quad . \; . \; . \; . \; . \quad 8)$$

D unterscheidet sich in der Regel nicht erheblich von 1. Genau ist:

$$D = 1 + \mathfrak{A}V_0^2 + \mathfrak{B}(V_1^2 + V_2^2) + \mathfrak{C}V_0(V_1 + V_2) + \mathfrak{D}V_1V_2, \quad . \quad 9)$$

wo $\mathfrak{A}$, $\mathfrak{B}$, $\mathfrak{C}$, $\mathfrak{D}$ gegen 1 sehr kleine Konstante sind.

Schaltungen. Es sind hauptsächlich drei verschiedene Schaltungen des Quadrantelektrometers gebräuchlich, die Quadrantschaltung, die Nadelschaltung und die Doppelschaltung. Die beiden ersten benutzen eine Hilfsspannung, die dritte nicht.

In der Quadrantschaltung befindet sich N auf hohem Potential V_0, Q_2 ist geerdet, Q_1 auf einem gegen V_0 kleinem Potential V_1, so daß es in Formel (9) gegen V_0 vernachlässigt werden kann. Dann erhalten wir die folgenden vereinfachten Gleichungen:

$$D\alpha = a_0V_0^2 + a_1V_1^2 + b_1V_0V_1 + c_0V_0 + c_1V_1 \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 7a)$$

$$D = 1 + \mathfrak{A}V_0^2. \quad . \; . \; . \; . \; . \quad 9a)$$

Die 6 Konstanten der Formeln lassen sich durch Kommutieren von V_0 und V_1 auf zwei, nämlich b_1 und $\mathfrak{A}$, verringern. Eine dazu geeignete Schaltung ist in Figur 7 skizziert. An den Umschaltern I und II können sowohl je zwei untereinander (ausgezogene Lage) als auch je zwei nebeneinander (gestrichelte Lage) liegende Quecksilbernäpfe leitend miteinander verbunden werden. Dadurch wird an N das Potential $+V_0$ bezw. $-V_0$, an Q_1 das Potential $-V_1$ bezw. $+V_1$ gelegt. Kommutiert man der Reihe nach beide Schalter, so erhält man folgendes Schema, in welchem zu jedem Vorzeichen immer das darüber stehende Glied der Gleichung (7a) gehört:

Stellung des Umschalters I	II	$a_0V_0^2$	$a_1V_1^2$	$b_1V_0V_1$	c_0V_0	c_1V_1	
‖	‖	+	+	−	+	−	$= D\alpha_1$
=	‖	+	+	+	−	−	$= D\alpha_2$
=	=	+	+	−	−	+	$= D\alpha_3$
‖	=	+	+	+	+	+	$= D\alpha_4$

Rechnet man die Ausschläge α nach rechts von der Nullage der Skala positiv, nach links negativ und bildet man

$$z = \frac{1}{2}(\alpha_1 - \alpha_2 + \alpha_3 - \alpha_4),$$

so erhält man die Gleichung

$$(1 + \mathfrak{A}V_0^2)z = -2b_1V_0V_1. \quad . \; . \quad 10)$$

Bei dieser Art zu kommutieren werden gleichzeitig die Kontaktpotentialdifferenzen zwischen Q_1 und G, Q_2 und G, N und G

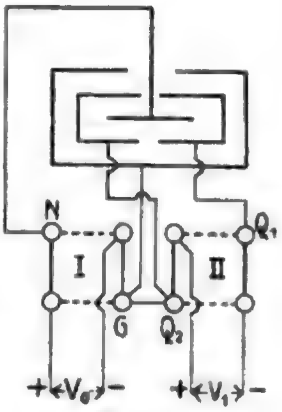


Fig. 7.

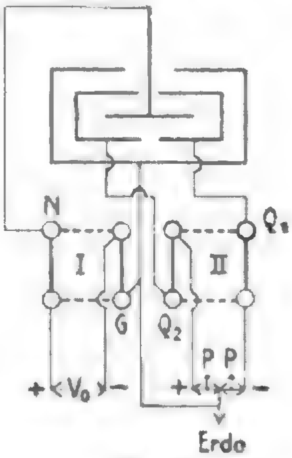


Fig. 8.

eliminiert. Sie sind aus diesem Grunde in der Elektrometerformel nicht besonders eingesetzt.

Arbeitet man stets mit derselben Hilfsspannung V_0, so erhält man die Elektrometerkonstante

$$C = -\left(\frac{1 + \mathfrak{A}V_0^2}{2b_1 . V_0}\right) = \frac{V_1}{z},$$

wenn man z bei einem bekannten V_1 beobachtet.

Findet man dann beim Anlegen eines unbekannten Potentials V_1' an Q_1 den Ausschlag z_1', so ist

$$V_1' = C . z'.$$

Um das Elektrometer für beliebige Hilfsspannungen V_0 zu eichen, genügt es, die Ausschläge z und z' bei einem bekannten V_1 und zwei bekannten Werten V_0 und V_0' der Hilfsspannung zu beobachten. Dann gelten die beiden Gleichungen

Digitized by Google

$$(1 + \mathfrak{A}V_0^2)z = -2b_1V_0V_1$$
$$(1 + \mathfrak{A}V_0'^2)z' = -2b_1V_0'V_1,$$

aus denen die Elektrometerkonstanten b_1 und $\mathfrak{A}$ berechenbar sind. Findet man dann bei einer beliebigen bekannten Hilfsspannung V_0'' beim Anlegen eines unbekannten Potentials V_1' an Q_1 den Ausschlag z'', so ist:

$$V_1' = -\left(\frac{1 + \mathfrak{A}V_0''^2}{2b_1V_0''}\right)z'' = C'z''.$$

Die Empfindlichkeit des Elektrometers ist nach Gleichung (10) proportional $\frac{2b_1V_0}{1 + \mathfrak{A}V_0^2}$; denn je größer diese Zahl wird, um so größer ist bei gegebenem V_1 der Ausschlag z.

Die Konstante $\mathfrak{A}$ kann nun positiv, negativ oder Null sein. Wie der Referent gezeigt hat, ist es bei einem geeignet konstruierten Quadrantelektrometer stets möglich, $\mathfrak{A}$ durch Justieren zu Null zu machen. Hier genüge die Angabe, daß dazu nötig ist, der Quadrantenschachtel mit Hilfe der sie tragenden Schrauben (S. 488) bestimmte Neigungen gegen die Ebene der Nadel zu erteilen.

Ist $\mathfrak{A} = 0$, so ist die Empfindlichkeit einfach proportional $2b_1V_0$, d. h. sie wird, wenn man V_0 auf den n-fachen Betrag bringt, n-mal so groß. Ist $\mathfrak{A}$ negativ, so ist die Empfindlichkeit bei n-fachem V_0 mehr als n-mal so groß, ist $\mathfrak{A}$ positiv weniger als n-mal so groß. Interessant ist, daß im Falle eines positiven $\mathfrak{A}$ die Empfindlichkeit ein Maximum besitzt, wenn $V_0 = \sqrt{\frac{1}{\mathfrak{A}}}$ wird. Steigert man die Hilfsspannung V_0 über diesen Wert hinaus, so wird die Empfindlichkeit des Instruments in der Quadrantschaltung nicht mehr größer, sondern wieder kleiner.

Je nach der Dicke des Platinfadens, der Höhe der Schachtel und der Größe der Längsachse der Nadel ist die Empfindlichkeit eines Quadrantelektrometers in weiten Grenzen verschieden. Die empfindlichsten Instrumente geben in der Quadrantschaltung noch für 0,00001 Volt einen merklichen Ausschlag. Zur Messung verhältnismäßig großer Spannungen ist diese Schaltung naturgemäß ungeeignet.

Das Quadrantelektrometer in der Quadrantschaltung, dessen Konstanten b_1 und $\mathfrak{A}$ durch Eichung mit Gleichspannungen bestimmt sind, findet eine wichtige Anwendung bei Leistungsmessungen an Wechselströmen. Betreffs näherer Angaben sei auf den Artikel „Elektrische Leistung" verwiesen.

Bei der Nadelschaltung werden Q_1 und Q_2 auf entgegengesetzt gleiche Potentiale $+P$ und $-P$ gegen Erde gebracht, während sich zwischen N und G eine gegen P kleine Potentialdifferenz V_0 befindet. Spezialisiert man die allgemeine Elektrometergleichung auf diesen Fall und kommutiert man Schalter I und II (Fig. 8) wie bei der Quadrant-

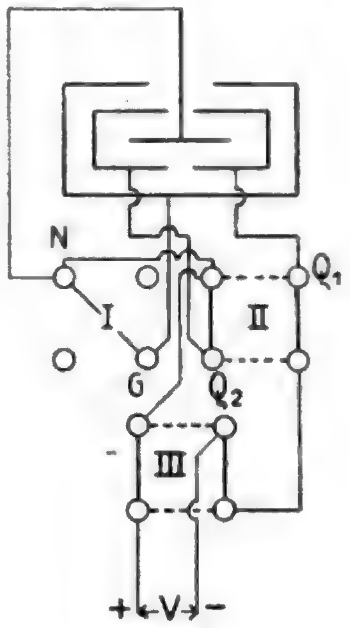


Fig. 9.

schaltung, so erhält man die Gleichung

$$[1 + (2\mathfrak{B} - \mathfrak{D})P^2]z = 2(-b_1 + b_2)V_0P, \quad 11)$$

die der Gleichung (10) vollkommen analog gebaut ist und deshalb in ganz ähnlicher Weise benutzt werden kann. Für $(2\mathfrak{B} - \mathfrak{D})$ gelten die oben für $\mathfrak{A}$ gemachten Angaben. Die erreichbare Empfindlichkeit ist dieselbe wie in der Quadrantschaltung. Die Nadelschaltung hat weniger für die Messung von Potentialen als für die Messung abgegrenzter Elektrizitätsmengen Bedeutung. Der Grund dafür ist, daß die Nadel leichter hoch isoliert werden kann und kleinere Kapazität besitzt als ein Quadrantenpaar.

Bei der Doppelschaltung liegen die Nadel und ein Quadrantenpaar am geerdeten Gehäuse, während sich das andere Quadrantenpaar auf einem Potential V befindet. In diesem Falle erhält die allgemeine Elektrometergleichung die Form

$$D\alpha = a_1V_1^2 + a_2V_2^2 + b_0V_1V_2 + c_1V_1 + c_2V_2 \quad . \; . \; . \; . \; . \; 7b)$$

$$D = 1 + \mathfrak{B}V^2. \quad . \; . \; . \; . \; . \; 9b)$$

Man kommutiert in diesem Falle (Fig. 9) nach folgenden Schema

Stellung des Kommutators III	II	$a_1V_1^2$	$a_2V_2^2$	$b_0V_1V_2$	c_1V_1	c_2V_2	
‖	‖	+	0	0	—	0	$= D\alpha_1$
=	‖	+	0	0	+	0	$= D\alpha_2$
=	=	0	+	0	0	+	$= D\alpha_3$
‖	=	0	+	0	0	—	$= D\alpha_4$

Digitized by Google

Bildet man jetzt $z = \frac{-\alpha_1 - \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4}{2}$, so erhält man die Elektrometergleichung

$$(1 + \mathfrak{B}V^2)z = (a_2 - a_1)V^2. \quad . \quad . \quad 12)$$

$\mathfrak{B}$ kann positiv, negativ oder gleich Null sein. Das letztere ist wieder durch Justieren des Elektrometers zu erreichen.

Ist $\mathfrak{B}$ gleich Null, so wird die Elektrometerkonstante $(a_2 - a_1)$ durch Beobachten von z bei einem bekannten V bestimmt. Wird für ein unbekanntes V' der Ausschlag z' abgelesen, so ist

$$V' = \sqrt{\frac{z'}{a_2 - a_1}}.$$

Ist $\mathfrak{B}$ von Null verschieden, so werden $(a_2 - a_1)$ und $\mathfrak{B}$ aus Ablenkungsbeobachtungen bei zwei verschiedenen V berechnet. Wird dann für ein unbekanntes V' der Ausschlag z'' gefunden, so ist

$$V' = \sqrt{\frac{z''}{a_2 - a_1 - \mathfrak{B}z''}}.$$

Quadrantelektrometer in der Doppelschaltung erlauben Spannungen von einigen Hundert Volt bei unempfindlichen Apparaten, bis hinab zu ½ Volt bei äußerst empfindlichen Apparaten, genau zu messen.

Legt man statt einer Gleichspannung eine Wechselspannung an das Elektrometer in Doppelschaltung, so geben die obigen Formeln mit den durch Gleichstromeichung bestimmten Konstanten ohne weiteres den Effektivwert der Wechselspannung. Dabei genügt es, allein den Schalter II zu kommutieren. Es ist dies wohl die genauste Methode der Messung effektiver Wechselspannungen (vgl. S. 487).

Falls man bei Messungen mit dem Quadrantelektrometer in der geschilderten Weise kommutiert, kann man, solange der Ausschlag z genügend groß ist, Potentialdifferenzen auf rund ½ ‰ genau messen. Die Genauigkeit wird erheblich geringer, wenn man auf das Kommutieren verzichtet und mit einseitigem Ausschlag arbeitet. Dazu ist man z. B. beim Messen abgegrenzter Elektrizitätsmengen gezwungen. Dann verringert man die Zahl der Konstanten in der allgemeinen Elektrometerformel durch Annahme gewisser Symmetrieverhältnisse am Elektrometer, die man nach von Hallwachs gegebenen Vorschriften durch Justieren des Elektrometers herzustellen sucht. Hallwachs justiert so, daß bei geerdetem Q_1 und Q_2 die infolge der Kontaktpotentialdifferenzen auftretenden Ausschläge entgegengesetzt gleich werden, wenn die Nadel hintereinander auf entgegengesetzt gleiche, hohe Potentiale $+ V_0$ und $- V_0$ gebracht wird. Bei sehr empfindlichen Elektrometern gelingt das sehr schwer und nur für verhältnismäßig kurze Zeit, so daß das Justieren häufig wiederholt werden muß.

β) Zylinderquadrantelektrometer. Bei diesen Instrumenten bilden die vier Quadranten nicht eine Schachtel, sondern den Mantel eines Kreiszylinders. Die Nadel besteht aus zwei starr verbundenen Mantelteilen eines konzentrischen Zylinders. Figur 10

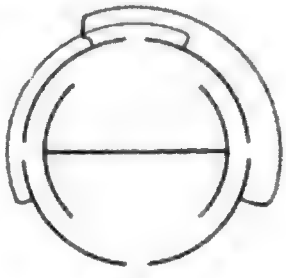


Fig. 10.

zeigt einen horizontalen Schnitt durch den wesentlichen Teil des Instrumentes, dessen Theorie und Behandlung dem gewöhnlichen Quadrantelektrometer analog ist.

γ) Binantenelektrometer. Statt aus zwei Quadrantenpaaren wird die Schachtel aus zwei Kreisbinanten gebildet. Die Nadel setzt sich aus zwei isolierten Binanten zusammen, die sich zu einem Kreis ergänzen. Sie wird bei allseitiger Erdung so gestellt, daß die beiden Schlitze senkrecht zueinander stehen. Für kleine Ausschläge hat dann das Instrument eine ähnliche Theorie und erfordert ähnliche Behandlung wie das Quadrantelektrometer. Ein brauchbares Spiegel-Binantenelektrometer hat Dolezalek konstruiert.

3) Elektrometer mit empirischer Skala. α) Elektrostatische Voltmeter. Alle diese Instrumente haben eine empirische Skala, an welcher direkt Volt abgelesen werden können.

Wir besprechen erstens einige Zeigerinstrumente, die den Schachtelelektrometern in Doppelschaltung ähnlich sind. Der prinzipielle Unterschied zwischen Zeigerinstrumenten und Spiegelinstrumenten liegt darin, daß man statt mit sehr kleinen mit großen Ablenkungen der Nadel arbeitet. Die Empfindlichkeit ist deshalb wesentlich geringer. Da ferner die obigen Elektrometerformeln nur für kleine Ablenkungen gelten, haben die Zeigerinstrumente eine empirische Skala.

Das empfindlichste Instrument dieser Art ist das Zeiger-Binantenelektrometer von Dolezalek. Die hohe Empfindlichkeit ist durch Verwendung einer sehr niedrigen Schachtel und eines sehr dünnen Platinfadens erreicht. In der Doppelschaltung

Digitized by Google

liegen N_1 und B_1 (Fig. 11) am geerdeten Gehäuse. Das zu messende Potential wird gleichzeitig an N_2 und B_2 gelegt. In der Nullage des Instruments steht die Nadel wie in Figur 11. Die Ablenkung erfolgt in der Richtung des Pfeils. Die ausnutzbare Skala beträgt etwa 100°. Der Ausschlag in Graden ist angenähert dem Quadrat der Spannung proportional. Das Instrument gestattet Potentialdifferenzen von 20 bis 50 Volt zu messen. Es besitzt keine besondere Dämpfungseinrichtung, da bei der niedrigen Schachtel die Luftdämpfung genügt, welche

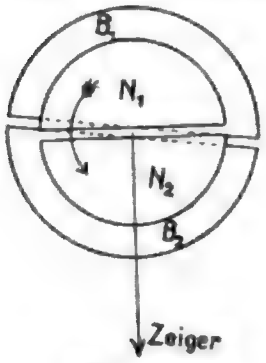


Fig. 11.

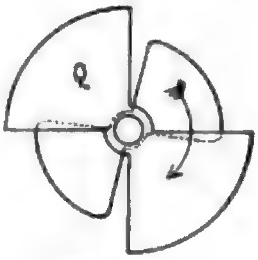


Fig. 12.

die Nadel erfährt. Das Elektrometer kann auch in einer der Quadrantschaltung analogen Schaltung benutzt werden. Es hat dann eine entsprechend höhere Empfindlichkeit und einen der zu messenden Spannung angenähert proportionalen Ausschlag.

Beim Multicellularvoltmeter von W. Thomson sind mehrere Quadrantenschachteln übereinander angeordnet. Die Nadeln sind alle auf eine an einem Drahte aufgehängte Achse gesetzt und dauernd mit dem Gehäuse verbunden. Das eine Quadrantenpaar, das in der Doppelschaltung mit dem Gehäuse verbunden werden müßte (S. 490), ist ganz weggelassen. Die zu messende Spannung wird zwischen das bestehenbleibende Quadrantenpaar Q und das Gehäuse gelegt. Die Nadel, welche in der Nullage die in Figur 12 angedeutete Lage gegen Q hat, wird in Richtung des Pfeils abgelenkt. Ein langer Aluminiumzeiger spielt über der in Volt geeichten, sehr ungleichmäßigen Skala von etwa 50° Ausdehnung. Die empfindlichsten dieser z. B. von White (Glasgow) gelieferten Instrumente gestatten Spannungen von 40 bis 160 Volt, die unempfindlichsten von 700 bis 1300 Volt zu messen. Sie besitzen eine Flüssigkeitsdämpfung.

Beim vertikalen elektrostatischen Voltmeter von W. Thomson ist das eine Quadrantenpaar Q einer einfachen Schachtel vertikal gestellt (Fig. 13). Die Nadel N ist in Schneiden gelagert und mit dem Gehäuse verbunden. Die Gewichtchen C werden bei an G liegendem Q so eingestellt, daß der Zeiger auf dem Nullstrich der Skala einsteht. Die zu messende Spannung wird zwischen Q und G gelegt. Je nach der Größe der Gewichte, die unten an der Nadel angehängt werden, mißt das Instrument 200 bis 4000 Volt im kleinsten und 1000 bis 20000

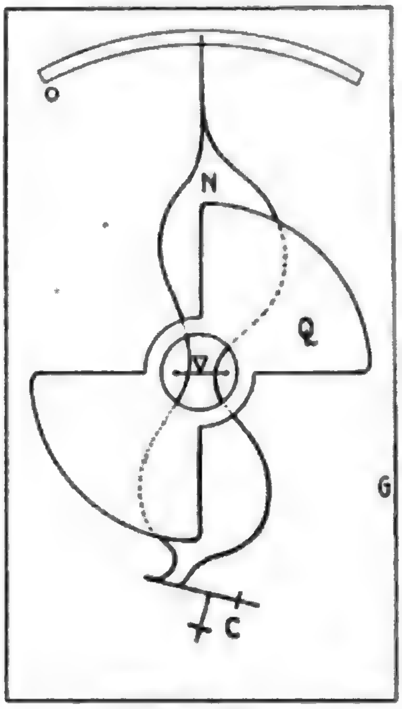


Fig. 13.

Volt im größten Meßbereich. Bei noch höheren Spannungen treten bei diesem Instrument Störungen durch stille Entladung auf. Die Dämpfung wird mittels einer primitiven Vorrichtung von Hand bewirkt.

Wir besprechen zweitens ein Zeigerinstrument, das ähnlich wie die absoluten Elektrometer angeordnet ist, die elektrostatische Wage von W. Thomson (Fig. 14). Die zu messende Spannung wird zwischen L_1 und G gelegt, mit dem L_2 leitend ver-

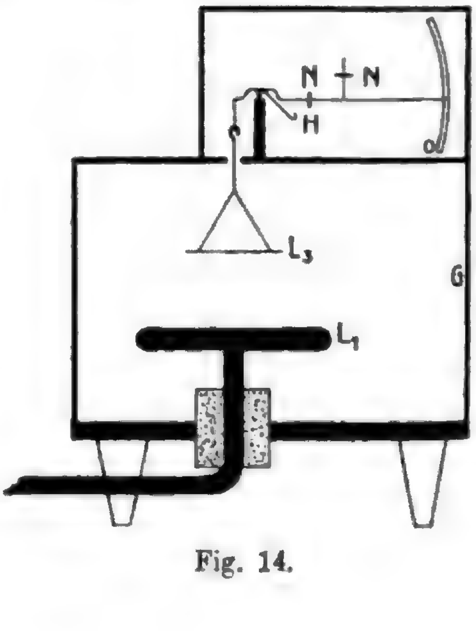


Fig. 14.

Digitized by Google

bunden ist. Die Gewichte N haben denselben Zweck wie die Gewichte C in Figur 13. Die Empfindlichkeit hängt von der Größe des an H hängenden Gewichtes ab. Die Meßbereiche sind 5000 bis 50000 Volt und 10000 bis 100000 Volt.

Die Dämpfung wird ähnlich wie beim vorigen Apparat bewirkt.

Daß man ein solches Instrument durch Verwendung von Druckluft bis etwa 200000 Volt brauchbar machen kann, ist bereits auf S. 487 erwähnt.

Elektrometer dieser Art mit Oel als Zwischenmedium, wie sie von Jona und Grau angegeben sind, sind nur für Wechselspannungen zu benutzen und weniger zuverlässig als Instrumente mit Druckluft als Zwischenmedium.

Die erwähnten elektrostatischen Voltmeter, die zusammen einen großen Meßbereich umspannen, haben, abgesehen vom Binantenelektrometer in der der Quadrantschaltung analogen Schaltung, sämtlich die aus Gold- oder Aluminiumfolie trägt. Die Metallplatte a schützt die Blättchen vor der Einwirkung von etwa auf i befindlichen Ladungen (S. 485). Die mit dem Gehäuse leitend verbundenen Backen e werden zusammengeschoben, wenn das Instrument transportiert werden soll. Bei mit dem geerdeten Gehäuse verbundenen Stab m liegen die Blättchen dicht an demselben an. Wird ein Potential an m gelegt, so werden sie abgestoßen. Durch die Lupe l sieht man die Ränder der Blättchen gleichzeitig mit der am Spiegel s reflektierten Skala k, die in Volt geeicht wird. Das Instrument mißt Potentiale von 50 bis 200 Volt.

Ihm ähnlich und für Potentiale von 500 bis 10000 Volt geeignet ist das Elektrometer von Braun (Fig. 16). Die Blättchen sind durch eine um eine horizontale Achse spielende leichte Aluminiumnadel ersetzt, deren unteres Ende sich vor einer auf gleichem Potential befindlichen Metallskala bewegt, die in Volt geeicht wird.

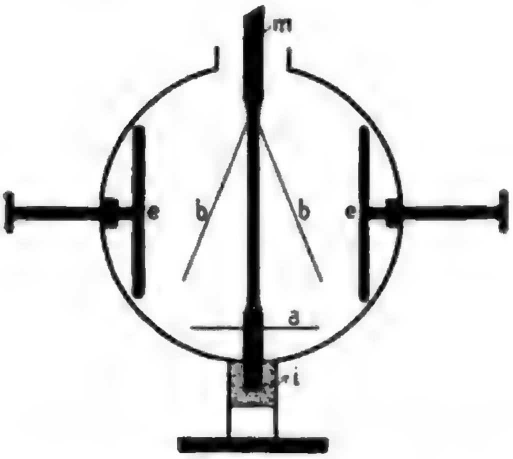


Fig. 15a.

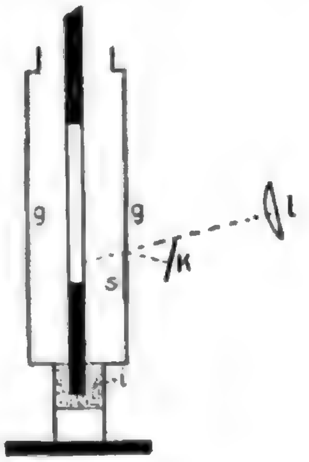


Fig. 15b.

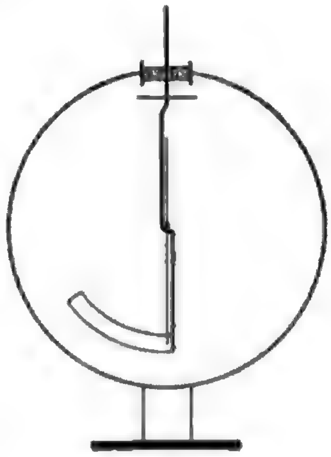


Fig. 16.

wichtige Eigenschaft, daß ihre Skala gleichzeitig für Gleichspannungen und für effektive Wechselspannungen gültig ist. Auf die große Anzahl anderer Formen dieser Instrumente gehen wir hier nicht ein.

β) Blättchen- und Saiten-Elektrometer. Diese Instrumente besitzen eine sehr kleine Kapazität und lassen sich leicht hoch isolieren. Sie sind deshalb für die Messung von Elektrizitätsmengen besonders geeignet. Wir betrachten sie zunächst als Apparate zur Messung von Potentialen. Ihre Skala ist empirisch. Sie stellen sich meist momentan ein.

Das Elektrometer nach Exner ist in der von Elster und Geitel verbesserten Form in Figur 15a u. b in Vorder- und Seitenansicht skizziert. Es besteht bis auf die Glasfenster G und den Isolator i vollkommen aus Metall. Vom Gehäuse isoliert ist allein der Stab m, der die Blättchen b

Blättchenelektrometer werden sehr empfindlich, wenn man sie mit einer Hilfsspannung von 100 bis 200 Volt benutzt. Beim Elektrometer von Hankel sind die Backen e vom geerdeten Gehäuse, das in Figur 17 fortgelassen ist, isoliert und werden auf entgegengesetzt gleichen Potentialen + V und — V gehalten. Bei mit dem Gehäuse verbundenem m hängt das Blättchen b etwa senkrecht nach unten. Wird ein Potential an m gelegt, so wird es je nach dem Vorzeichen desselben nach der einen oder anderen Seite abgelenkt. Ein Mikroskop mit Okularskala mißt die kleine Verschiebung einer scharfen Zacke des Blättchens. Die Empfindlichkeit läßt sich durch Aenderung der Hilfsspannung und der Entfernung der Backen e in weiten Grenzen variieren. Im günstigsten Falle läßt sich noch eine Potentialdifferenz von 0,01 Volt beobachten.

Digitized

Die beschriebene Schaltung des Hankelschen Elektrometers entspricht der Nadelschaltung des Quadrantelektrometers. Es ist klar, daß man das Instrument auch analog der Quadrantschaltung und der Doppelschaltung benutzen kann. Im letzteren Falle mißt es Potentialdifferenzen bis 100 Volt.

Geeignetes Kommutieren, wie wir es beim Quadrantelektrometer kennen gelernt haben, eliminiert Unsymmetrieen und die Kontaktpotentialdifferenzen.

Für luftelektrische Messungen sind mehrere ähnliche, zum Teil noch empfindlichere Apparate konstruiert worden.

Die Blättchenelektrometer zeigen zwei Mängel. Einmal veranlaßt die Unebenheit der Blättchen leicht eine Unsicherheit in der Ablesung; sodann fallen die Blättchen, wenn man sie bei allmählich sinkendem Potential beobachtet, nicht kontinuierlich sondern sprungweise zusammen. Diese sogenannte „Cri-Cri-Erscheinung" hängt jedenfalls mit der mechanischen Steifheit der Blättchen zusammen.

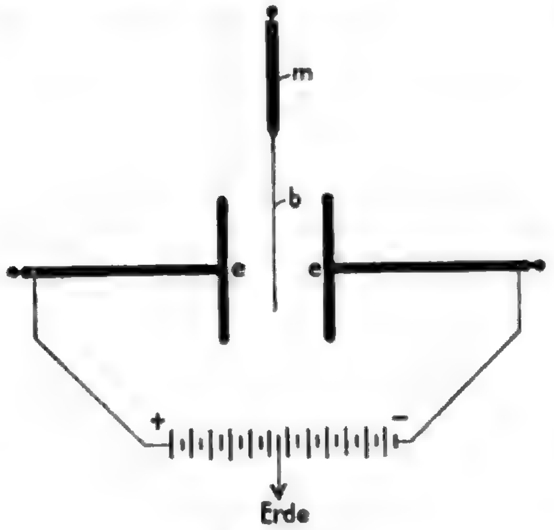


Fig. 17.

Von diesen Mängeln frei sind die in neuester Zeit konstruierten Saitenelektrometer. Man erhält z. B. ein solches, wenn man nach dem Vorgange von Elster und Geitel beim Hankelschen Elektrometer das herunterhängende Blättchen durch einen Platinfaden oder versilberten Quarzfaden ersetzt.

Das Saitenelektrometer von Edelmann unterscheidet sich von diesem dadurch, daß die Saite oben und unten gefaßt ist und verschieden stark gespannt werden kann. Wird an die Saite eine Hilfsspannung von 1500 Volt gelegt, so kann man im günstigsten Falle eine Potentialdifferenz von 0,001 Volt zwischen den Backen noch gerade erkennen. Die Verwendung noch höherer Hilfsspannungen ist nicht möglich, weil an dem dünnen Faden Störungen durch elektrischen Wind auftreten.

Bei der neuesten Form des Saitenelektrometers von Wulf (Fig. 18) bildet der Faden b eine Schleife, die durch eine Quarzfeder f gespannt wird. Der Faden ist von einer vom Gehäuse isolierten Hilfselektrode umgeben, in welcher die Drahtwinkel w vorspringen. Wird die Hilfselektrode auf ein z. B. positives Potential gebracht, so werden die beiden Fadenhälften durch Influenz negati und sperren in der durch die Drahtwinkel bestimmten Ebene auseinander. Die Hilfsspannung wird so gewählt, daß ein passender, mit dem Mikroskop abgelesener Ausschlag, der als Nullage gerechnet wird, zustande kommt. Ist das an die Blättchen gelegte, zu messende Potential

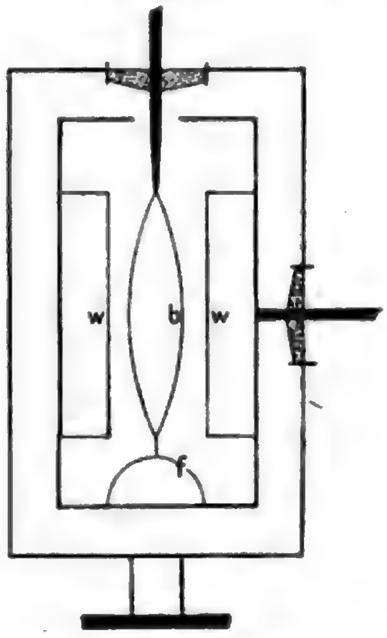


Fig. 18.

positiv, so wird ihr Abstand kleiner und umgekehrt. Die Instrumente gestatten je nach ihrer Empfindlichkeit Spannungen von einigen Volt aufwärts bis 1400 Volt zu messen. Die Skala ist nahezu gleichmäßig.

3. Messung von Potentialdifferenzen.

3a) Potentialdifferenzen zwischen Leitern. Es handelt sich um die Aufgabe, die Potentialdifferenzen zu messen zwischen den Polen einer galvanischen Batterie oder zwischen zwei Punkten einer von Gleichstrom bezw. Wechselstrom durchflossenen Leitung oder zwischen den Belegungen einer Leidener Flasche oder eines anderen Kondensators von so großer Kapazität, daß die Elektrometerkapazität dagegen zu vernachlässigen ist.

Die absoluten Elektrometer gestatten Spannungen von 1000 Volt aufwärts direkt in Volt zu messen. Alle übrigen Instrumente müssen zuvor auf Volt geeicht werden.

Digitized by Google

Dazu benutzt man die genau bekannte Spannung von 1, 2, 3 ... Normalelementen (je 1,0183 Volt bei Kadmiumnormalelementen). Bei höheren Spannungen verwendet man am besten kleine Bleiakkumulatoren (etwa je 2 Volt), deren Spannung mit derjenigen von Normalelementen verglichen ist. Die Physikalisch-Technische Reichsanstalt besitzt eine solche Batterie von 5500 Elementen, also von etwa 11000 Volt. Die Eichung von Elektrometern für noch höhere Spannungen erfolgt schließlich durch Vergleich mit den Angaben von absoluten Elektrometern. Die dazu nötigen Potentiale werden zweckmäßig durch eine mit einer Leidener Flasche großer Kapazität verbundene Influenzmaschine erzeugt. Bei Potentialdifferenzen über 50000 Volt ist ein dauernder Spannungsverlust über die Isolatoren nicht zu vermeiden. Die Spannung muß dann durch geeignetes Nachregulieren konstant gehalten werden.

3b) Luftpotentiale. Zur Kenntnis des elektrischen Feldes der Erdkugel ist es nötig, die Potentialdifferenz irgendeines Punktes der Atmosphäre gegen den Erdboden zu messen. Diese Aufgabe hat W. Thomson einwandfrei mittels des Tropfkollektors gelöst. Eine mit Wasser gefüllte Glasflasche (Fig. 19) ist so eingerichtet, daß bei etwas geöffnetem Hahn h das Wasser bei a abtropft. Hat das Wasser, das als Leiter anzusehen ist, ein anderes Potential wie die Luft an der Stelle a, so führen die Wassertropfen so lange Ladung hinweg, bis das ganze Wasser das Luftpotential bei a angenommen hat. Das Potential des Wassers gegen Erde wird z. B. mittels des Exnerschen Elektrometers gemessen, dessen Gehäuse geerdet und dessen Blättchenträger durch einen Draht mit dem Wasser verbunden ist.

Bei der Thomsonschen Anordnung erfolgt das Aufladen des Tropfkollektors auf das betreffende Luftpotential sehr langsam. Sehr beschleunigt wird dieser Prozeß, wenn man den Apparat als Wasserzerstäuber einrichtet. Eine moderne Form desselben, der Spritzkollektor von Budig besitzt eine Aufladezeit von nur 4 Sekunden bei 10 ccm Wasserverbrauch pro Minute.

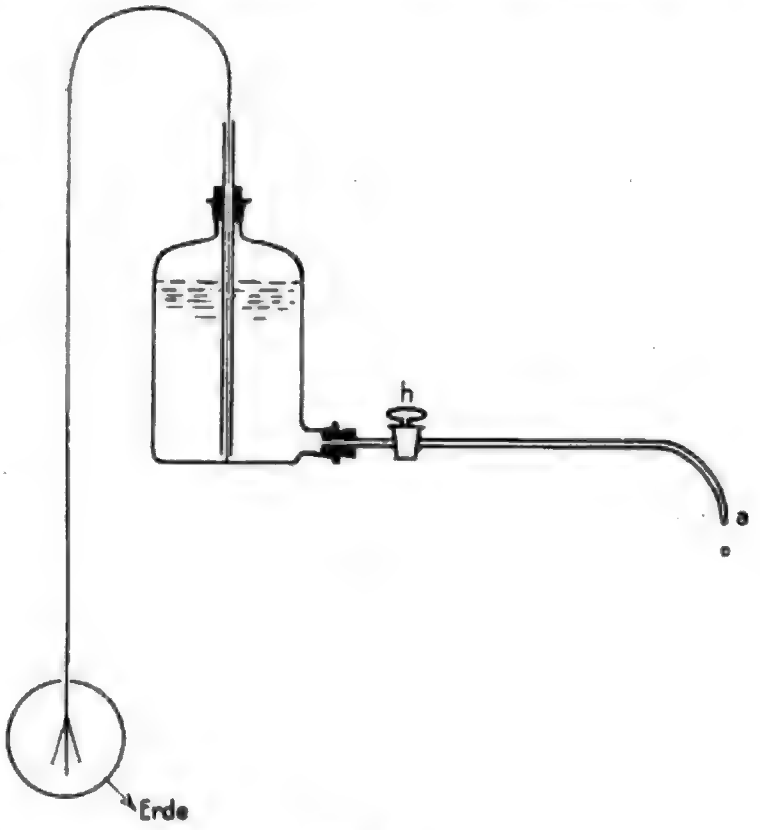


Fig. 19.

Auch eine Spitze, eine Flamme, ein radioaktives Präparat nehmen das Potential der umgebenden Luft an, scheinen aber etwas weniger zuverlässige Resultate zu geben als der Tropf- oder der Spritzkollektor.

4. **Messung von Elektrizitätsmengen.** Ist ein isolierter Konduktor von einer geerdeten Hülle umgeben, so besteht zwischen einer auf ihm befindlichen Elektrizitätsmenge e und seinem Potential v gegen Erde die Beziehung

$$e(\text{Coulomb}) = K\,(\text{Farad}) \times v\,(\text{Volt}), \quad (13)$$

wo K die Kapazität des Konduktors ist (S. 484).

Die Aufgabe, die Elektrizitätsmenge e zu messen, läßt sich also zurückführen auf die Messung einer Kapazität K und einer Spannung v. Ist K bekannt, so haben wir zur Bestimmung von e nur das Potential v des sorgfältig isolierten Konduktors gegen Erde mit einem ebenso isolierten, für einseitigen[1]) Ausschlag auf Volt geeichten Elektrometer zu messen.

Das ist sehr einfach, wenn K so groß ist, daß die Elektrometerkapazität K' dagegen zu vernachlässigen ist. Bei unbekanntem K kann man dann verschiedene auf den Konduktor gebrachte Elektrizitätsmengen miteinander vergleichen. Denn sie sind einfach den Voltangaben des Elektrometers proportional.

Schwieriger wird es, wenn K' nicht gegen K zu vernachlässigen ist.

---

[1]) Ein Kommutieren ist in diesem Falle unmöglich.

Digitized by Google

Benutzen wir ein Elektrometer ohne Hilfspotential, z. B. ein Exnersches Elektrometer oder ein Quadrantelektrometer in Doppelschaltung, so gilt, wenn v die Voltangabe des Elektrometers ist, für e die Gleichung:

$$e = (K + K')v. \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 14)$$

K' bedeutet die Kapazität der auf Spannung befindlichen Teile des Elektrometers nebst Zuleitungen, die durch eine geerdete Hülle zu schützen sind. Da K' sich etwas mit dem Ausschlag des Elektrometers ändert, muß es streng genommen für jeden Ausschlag besonders bestimmt werden (S. 497).

Benutzen wir ein Elektrometer mit Hilfspotential, so tritt eine weitere Komplikation ein. Mit Berücksichtigung der Formeln (1) auf S. 484 ist z. B. für ein Quadrantelektrometer in Nadelschaltung die auf der Nadel befindliche Elektrizitätsmenge, falls das vom Elektrometer gemessene Nadelpotential v_3 ist, und $v_1 = +P$ und $v_2 = -P$ die Hilfspotentiale der Quadrantenpaare sind,

$$e_3 = (K_{13} - K_{23})P + K_{33}v_3 = Sv_3. \quad 15)$$

Die gesuchte Elektrizitätsmenge ist also

$$e = (K_{13} - K_{23})P + (K + K_{33})v_3 = (K + S)v_3. \quad 15a)$$

Verwendet man zur Messung von e ein Quadrantelektrometer in Quadrantschaltung, so ist, wenn $v_3 = P$ das Hilfspotential der Nadel und v_1 das vom Elektrometer gemessene Potential des nicht geerdeten Quadrantenpaares ist, die auf diesem befindliche Ladung:

$$e_1 = \ldots . K_{11}v_1 + K_{13}P = \ldots . . S'v_1 \quad 16)$$

$$e = (K + K_{11})v_1 + K_{13}P = (K + S')v_1. \quad 16a)$$

S und S' wollen wir mit Harms als scheinbare Elektrometerkapazitäten für die betreffenden Meßanordnungen bezeichnen. Sie müssen, wenn man die Messung von e auf eine Messung von v zurückführen will, von Fall zu Fall bestimmt werden (S. 497).

Statt dies zu tun, ist es in der Regel einfacher, das Elektrometer in Verbindung mit dem betreffenden Konduktor direkt auf Elektrizitätsmengen zu eichen.

Das ist möglich mit Hilfe des Faradayschen Eimers, der auf folgendem Satz beruht. Führt man in das Innere eines isolierten hohlen Metallkörpers einen geladenen Leiter (z. B. eine kleine Kugel) durch eine kleine Oeffnung hindurch ein, und bringt man sie in leitende Verbindung mit der Innenwand, so geht ihre ganze Elektrizitätsmenge auf die Außenwand des Metallkörpers über.

Harms hat, diesen Satz benutzend, die in Figur 20 skizzierte Anordnung zum Eichen eines Elektrometers auf Elektrizitätsmengen angegeben. A ist der Faradaysche Eimer, der z. B. mit dem Blättchenträger eines Exnerschen Elektrometers verbunden ist. D ist das geerdete Gehäuse. Die festen Isolatoren sind nicht gezeichnet. K ist eine Hohlkugel aus Messing vom Radius R = 4,5 cm. Sie befindet sich auf gleichem Potential mit dem aus der Glaskapillare S austropfenden Wasser. Ist r der Radius der Tropfen, der zwischen 1,5 und 2,6 mm variiert werden kann und für längere Zeit konstant bleibt, so ist die auf dem herabfallenden Wassertropfen befindliche Elek-

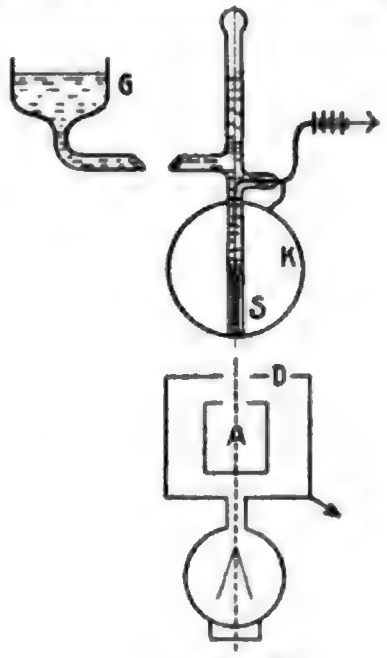


Fig. 20.

trizitätsmenge, wenn dieser im Augenblick des Abreißens als kugelförmig angesehen wird,

$$e_r = vr\frac{\pi^2}{6}\frac{r}{R}.$$

Die Tropfen fallen in den Faradayschen Eimer A und führen ihm so bekannte Elektrizitätsmengen zu, die bestimmte Ausschläge des Elektrometers veranlassen. Die Geschwindigkeit des Austropfens wird durch Heben und Senken des Gefäßes G reguliert.

Viel genauere Resultate als die eben beschriebene gibt eine andere Anordnung von Harms (Fig. 21). An die Stelle des Tropfapparates tritt ein Kondensator, für welchen der Induktionskoeffizient $K_{I\,II}$

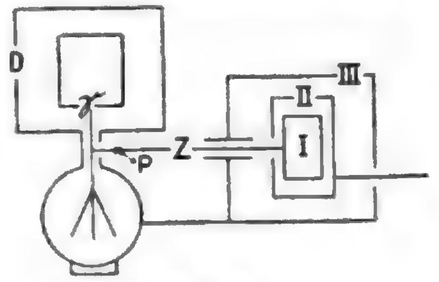


Fig. 21.

zwischen Hülle I und II bekannt sein muß, und der dauernd mit dem Elektrometer verbunden bleibt. III und D sind geerdete Schutzhüllen. Man legt nun, während I nebst den daran hängenden Leitern $(I + z + \gamma)$ geerdet ist, an II ein bekanntes Potential v. Hebt man dann die Erdung an $(I + z + \gamma)$ auf und erdet II, so befindet sich auf $(I + z + \gamma)$, unabhängig von der Größe der Kapazität von z und γ, die Elektrizitätsmenge

$$e = K_{I\,II} \cdot v,$$

für welche das Elektrometer einen bestimmten Ausschlag zeigt. Wenn man v entsprechend wählt, kann man so beliebige bekannte Elektrizitätsmengen auf $(I + z + \gamma)$ bringen.

Die Anordnungen in Figur 20 und 21 sind für luftelektrische Zerstreuungsmessungen geeignet.

Ueber die Messung von großen Elektrizitätsmengen mittels des ballistischen Galvanometers vgl. den Artikel „Elektrischer Strom".

5. **Messung von Kapazitäten.** Ueber die Berechnung von Kapazitäten aus den Abmessungen der Leiter, über absolute Kapazitätsmessung usw. vgl. den Artikel „Kapazität".

Wir beschränken uns hier auf die Methoden zur Vergleichung von Kapazitäten, bei welchen Elektrometer als Meßinstrumente benutzt werden. Wollen wir Kapazitäten in Farad messen, so muß uns eine in diesem Maß bekannte Vergleichskapazität zur Verfügung stehen.

5a) Vergleichung durch Ladungsteilung. Nach dieser Methode kann man die Kapazität eines Elektrometers in bequemer und genauer Weise z. B. mittels der in Figur 21 gegebenen Anordnung von Harms bestimmen, wenn der Induktionskoeffizient $K_{I\,II}$ in Farad bekannt ist (S. 496). Man lädt $I + z + \gamma$ mit einer bekannten Elektrizitätsmenge $e = K_{I\,II} \cdot v$ Coulomb. Zeigt dann das Elektrometer v_1 Volt an, so ist die Gesamtkapazität

$$K_{I+z+\gamma} = \frac{e}{v_1} \text{ Farad.}$$

Um weiter die Kapazität K_γ des Elektrometers zu bestimmen, wird jetzt, während II geerdet bleibt, der Kontakt bei P, der leicht lösbar sei, aufgehoben, am besten durch Drehen des Kondensators (I, II, III) um eine vertikale Achse. Dabei gehen die Blättchen des Elektrometers, wegen der etwas geänderten Lage ungeschützter Leiter gegeneinander, ein wenig zusammen. Der Kondensator wird so weit gedreht, bis der Ausschlag der Blättchen konstant wird. Er entspreche dem Potential v_2 Volt. Das Elektrometer wird entladen und durch Drehung des Kondensators der Kontakt bei P wieder hergestellt. Zeigt dann das Elektrometer das Potential v_3 Volt an, so ist die Kapazität des Elektrometers:

$$K_\gamma = K_{I+z+\gamma} \frac{v_1 - v_3}{v_3} \text{ Farad.}$$

Bei einem Elektrometer ohne Hilfsspannung, wie es in Figur 21 angenommen ist, ist K_γ die wahre Kapazität, bei einem Elektrometer mit Hilfsspannung die scheinbare Kapazität des Elektrometers (S. 496).

Nachdem so die Kapazität des Elektrometers K_γ bestimmt ist, vergleicht man die (nicht zu kleinen) Kapazitäten zweier beliebiger, durch eine geerdete Hülle geschützter Leiter in folgender Weise. Leiter I und das Elektrometer werden auf das Potential v geladen. Der vorher abgeleitete Leiter II wird zugeschaltet. Sinkt dann das Potential auf v', so ist:

$$\frac{K_{II}}{K_I + K_\gamma} = \frac{v - v'}{v'}.$$

Sind K_I und K_{II} sehr klein, so tritt beim Zuschalten von Leiter II die oben erwähnte Störung ein und ist entsprechend zu berücksichtigen. Die Isolation muß bei dieser Methode sehr hoch sein.

5b) Vergleichung durch Gegenstellen. Leiter I und II werden (Fig. 22) durch gal-

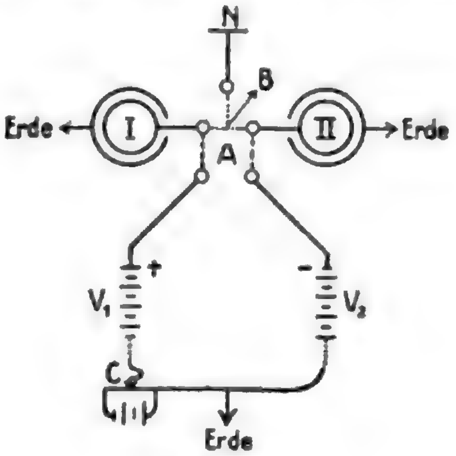


Fig. 22.

vanische Elemente, die mittels des Schalters A angelegt werden, auf Potentiale $+v_1$ und $-v_2$ gegen Erde gebracht. Der Schalter A wird entfernt, und es werden mittels des Schalters B die Leiter I und II untereinander und z. B. mit der vorher abgeleiteten Nadel N eines Quadrantelektrometers in Nadelschaltung verbunden. Sind $+v_1$ und $-v_2$ so abgeglichen, daß die Nadel keinen Ausschlag zeigt, so ist

$$\frac{K_I}{K_{II}} = \frac{v_2}{v_1}.$$

Die grobe Einstellung von $+v_1$ und $-v_2$ geschieht durch die Wahl der Anzahl von Elementen rechts und links von der Erdleitung, die Feineinstellung durch Verschieben des Kontakts C auf einem Schleifdraht von hohem Widerstande, durch den z. B. zwei hintereinandergeschaltete Elemente geschlossen sind.

5c) Vergleichung in der Brücke. Die Methode ist der vorigen ähnlich. Der große Widerstand $w_1 + w_2$ (Fig. 23)

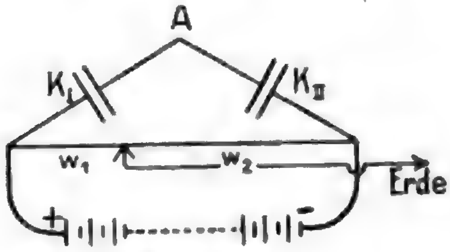


Fig. 23.

liegt an den Polen einer Batterie, die gleichzeitig mit je einer Belegung der Kondensatoren I und II verbunden sind. Die anderen Belegungen von I und II sind miteinander verbunden. Man schiebt den Erdkontakt so, daß beim Verbinden von A mit der vorher abgeleiteten Nadel des Elektrometers kein Ausschlag erfolgt. Dann ist

$$\frac{K_I}{K_{II}} = \frac{w_2}{w_1}.$$

Vor dem Anlegen der Batterie sind alle Teile zu entladen.

Bei den Methoden b) und c) kommt die Kapazität des Elektrometers nicht in Betracht.

6. Messung von Dielektrizitätskonstanten. 6a) Bestimmung mit dem Kondensator. Die Messung beruht auf dem Satz, daß die Kapazität K_ε eines Kondensators, der einen isotropen Isolator mit der Dielektrizitätskonstanten ε als Zwischenmedium besitzt, εmal so groß ist als die Kapazität K_1 desselben Kondensators, wenn er Luft als Zwischenmedium besitzt. Vorausgesetzt ist, daß alle elektrischen Kraftlinien durch das Dielektrikum laufen.

Wissenschaftlich gilt statt der Luft das Vakuum als Einheit; dann hat Luft bei Atmosphärendruck die Dielektrizitätskonstante $\varepsilon = 1{,}0006$. Durch Multiplikation mit dieser Zahl werden also die gemessenen Dilelektriztätskonstanten auf das Vakuum bezogen. Der Unterschied ist für flüssige und feste Körper praktisch gleichgültig, aber bei den Angaben für Gase sorgfältig zu beachten.

Die Messung einer Dielektrizitätskonstanten läßt sich also auf zwei Kapazitätsmessungen zurückführen. Die oben beschriebenen Methoden der Kapazitätsvergleichung lassen sich für diesen Zweck nur verwenden, wenn man es mit einem so gut wie vollkommen isolierenden Dielektrikum zu tun hat.

Bei Flüssigkeiten bestimmt man nach 5b) oder c) die Kapazität z. B. eines Zylinderkondensators, dessen äußere Belegung geerdet wird, einmal wenn er mit Luft, das andere Mal, wenn er mit der betreffenden isolierenden Flüssigkeit gefüllt ist. Ist die Kapazität im ersten Falle K_1, im zweiten K_ε, so ist

$$\varepsilon = \frac{K_\varepsilon}{K_1}.$$

Bei Gasen, deren Dielektrizitätskonstante ε gegen das Vakuum nach demselben Prinzip gemessen wird, sind bei den Kapazitätsmessungen wegen der geringen Abweichung des ε von 1 sehr empfindliche Nullmethoden erforderlich, auf die wir hier nicht eingehen.

Bei festen Körpern ist zu beachten, daß die Kondensatorplatten, z. B. des Kohlrauschschen Kondensators, den ebenfalls in Plattenform gegebenen festen Körper nicht berühren dürfen, weil sonst Störungen durch Ladungen auf der Oberfläche der dielektrischen Platte auftreten. Sind alle Platten einander parallel, ist ferner a der Plattenabstand des Kondensators (klein gegen den Radius!) und d die Dicke der dielektrischen Platte, die weit größer sein muß als die Kondensatorplatten, so ist, falls K_1 die Kapazität des Kondensators mit Luft, K_ε die Kapazität bei eingeschobener Platte bedeutet

$$\frac{1}{\varepsilon} = 1 - \frac{a}{d}\,\frac{K_\varepsilon - K_1}{K_\varepsilon}.$$

Statt den Abstand a direkt zu messen, kann man nach Einschieben des Dielektrikums den Plattenabstand des Kondensators um einen Betrag δ so ändern, daß die Kapazität wieder die frühere ist. Dann ist:

$$\varepsilon = \frac{d}{d - \delta}.$$

Hierbei wird gleichzeitig die Kapazität der Zuleitungen, die sonst zu berücksichtigen ist, eliminiert.

6b) Bestimmung durch Kraftwirkungen. Die Messung beruht auf dem Satz, daß auf konstanter Potentialdifferenz gehaltene Leiter sich anziehen mit einer Kraft, die ceteris paribus der Dielektrizitätskonstanten des Zwischenmediums proportional ist.

Silow hat z. B. ein Quadrantelektrometer in Doppelschaltung benutzt, dessen Ausschlag für eine konstante Potentialdifferenz er bei Füllung mit Luft bezw. mit isolierender Flüssigkeit bestimmte. Bei Spuren von

Digitized by Google

Leitfähigkeit der Flüssigkeit stört die Polarisation. Man mißt dann bei einer konstant gehaltenen Wechselspannung.

Betreffs der zahlreichen weiteren Methoden zur Messung der Dielektrizitätskonstanten, speziell bei schlecht isolierenden und bei leitenden Dielektriken, auf die an dieser Stelle nicht eingegangen werden soll, vergleiche man den Artikel „Dielektrizität".

Literatur. *Die ziemlich umfangreiche Literatur ist zusammengestellt in* **Winkelmanns** *Handbuch der Physik Bd. IV (1905) bis zum Jahre 1902, in* **Chwolsons** *Lehrbuch der Physik (1908) Bd. IV bis zum Jahre 1907, in* **Kohlrauschs** *Lehrbuch der Praktischen Physik (1910) bis zum Jahre 1909. Die einschlägigen Arbeiten der letzten Jahre sind fast sämtlich in der Physikalischen Zeitschrift und in der Zeitschrift für Instrumentenkunde zu finden.*

H. Schultze.

Endlicher
Stephan Ladislaus.

Er wurde am 24. Juni 1805 in Preßburg geboren, studierte zunächst Theologie, verließ dieses Studium aber wieder und wurde 1828 Skriptor an der k. k. Hofbibliothek in Wien und 1836 Kustos der botanischen Ableilung des k. k. Hofnaturalienkabinetts. Im Jahre 1840 promovierte er und übernahm im selben Jahre die ordentliche Professur der Botanik und die Direktion des Botanischen Gartens der Wiener Universität. Trotz eines sehr geringen Gehaltes legte er aus seinem Privatvermögen eine umfangreiche Bibliothek und ein Herbar an, die er dem Staate schenkte. Weitere Vermehrung dieser Sammlungen, sowie die Herausgabe eigener und fremder Werke auf seine Kosten führten zu seinem finanziellen Ruin, der ihn veranlaßte, am 28. März 1849 seinem Leben durch Blausäure ein Ende zu machen. — Unter seinen Schriften seien eine Flora von Preßburg (1830), die „Genera plantarum secundum ordinem naturalem dispositarum" (Wien, mit Suppl. I, 1836 bis 1840; Suppl. II bis V, 1842 bis 1850) und das „Enchiridion botanicum, exhibens classes et ordines plantarum, accedit nomenclator generum et officinalium vel usualium indicatio" (Leipzig und Wien 1841) genannt. Er setzte hierin vor allem die Betrebungen Jussieus, Gärtners, De Candolles und Robert Browns fort, in einem natürlichen System die stufenweisen Verwandtschaften darzustellen. Die Charakteristik der Familien und Gattungen ist ausgezeichnet, in der Haupteinteilung seines Systems war er wenig glücklich. — Er hat sich auch auf anderen Gebieten schriftstellerisch betätigt, z. B. durch Veröffentlichung einer chinesischen Grammatik, von Schriften zur ungarischen Rechtsgeschichte usw.

Literatur. *Augsburger allgemeine Zeitung 1849, Beilage Nr. 129. —* **A. Kanitz,** *„Versuch einer Geschichte der ungarischen Botanik", Linnaea, Bd. 33, (1864—65), S. 583—588.*

W. Ruhland.

Energetik der Organismen.
Allgemeine Energetik der Organismen.

1. Definition. 2. Der erste Hauptsatz. 3. Der zweite Hauptsatz. 4. Die Energieformen, die für die Organismen eine Rolle spielen. 5. Die Energiezufuhr. 6. Die Energieumwandlungen: a) Produktion chemischer Energie. b) Produktion elektrischer Energie. c) Produktion strahlender Energie. d) Produktion mechanischer Energie. e) Produktion von Wärme. 7. Die Energieabgabe.

1. **Definition.** Die Energetik der Organismen ist die Lehre von den Wandelungen der Energie in lebenden Körpern. Unter Energie versteht man das Vermögen eines Körpers oder Systems, Arbeit zu leisten. Die Energie, die ein Körper enthält, wird gemessen durch eine Arbeitsgröße (Meterkilogramm) und kann bezeichnet werden als seine Arbeitsfähigkeit. Die Arbeitsfähigkeit der Organismen erfährt beständige Aenderungen, es herrscht in ihnen, solange sie leben, niemals Gleichgewicht, und zwar beruhen diese Aenderungen auf Energiezufuhr und Energieabgabe.

Die Aufgabe der allgemeinen Energetik der Organismen besteht darin, die Wege zu verfolgen, auf denen den Organismen Energie zugeführt wird, die Wandelungen zu beschreiben, die die Energie in den Organismen erfährt und die Art und Weise darzustellen, wie die Energie von den Organismen abgegeben wird.

2. **Der erste Hauptsatz.** Die axiomatische Grundlage jeder Energetik im Gebiete des Unbelebten ist der erste Hauptsatz der mechanischen Wärmetheorie, der Satz von der Erhaltung der Energie; und es fragt sich zunächst, ob es ohne weiteres gerechtfertigt ist, an eine Energetik der Organismen mit der Voraussetzung heranzutreten, daß auch für sie dieser Satz uneingeschränkte Geltung habe. Bei der fundamentalen Bedeutung, die das Prinzip der Erhaltung der Energie für unser ganzes naturwissenschaftliches Denken hat, wäre es sicher berechtigt, seine Gültigkeit für das Gebiet der belebten Körper zu postulieren und auf dieser Grundlage zu bauen, bis ein Gegenbeweis erbracht, oder auch nur wahrscheinlich gemacht wäre, daß dies Grundprinzip auf Organismen keine Anwendung finden könne. Ein Einwand würde nur von vitalistischer Seite gemacht werden, und brauchte solange in einer ernsthaften Diskussion keine Berücksichtigung zu finden, bis eine greifbare Definition der hypothetischen „Lebenskraft"

gegeben worden wäre, die eine Prüfung der praktischen Konsequenzen einer solchen Anschauung ermöglichen würde. Bei der vorwiegend unphilosophischen, rein empirischen, Richtung der heutigen Naturwissenschaft muß es aber als ein günstiger Umstand betrachtet werden, daß auch der experimentelle Nachweis der Gültigkeit des ersten Hauptsatzes an lebenden Objekten, und zwar gerade am Menschen und an Säugetieren mit einer Genauigkeit erbracht worden ist, wie wir sie bei biologischen Fragen nur selten zu erreichen vermögen. Alle Energie, die dem Organismus durch die Nahrung zugeführt wird, wird als äußere meßbare Arbeit oder als Wärme (größtenteils) abgegeben. Die Bilanz, durch welche die Gültigkeit des ersten Hauptsatzes für die lebenden Systeme nachgewiesen werden soll, muß also durch Vergleich der Stoffzufuhr und Stoffabgabe feststellen, wie groß der Brennwert (Energiegehalt) der Stoffe ist, die im Körper zur Oxydation gelangen. Dieser berechnete Wert muß verglichen werden mit der direkt gemessenen Wärmemenge, welche der Körper abgibt. Wird äußere Arbeit geleistet, so muß auch diese gemessen und in Wärme umgerechnet werden.

In äußerst mühevollen und gründlichen Untersuchungen hat zunächst Rubner für den Hund nachgewiesen, daß sich bei einer solchen Bilanz in der Tat die Gültigkeit des ersten Hauptsatzes nachweisen läßt und Atwater hat in noch ausgedehnteren Versuchsreihen denselben Beweis für den Menschen erbracht. Bei dem großen allgemeinen Interesse, das diese Zahlen beanspruchen, mögen die Resultate etwas näher mitgeteilt werden. Die Versuche beziehen sich zunächst auf ruhende Menschen bei gewöhnlicher Kost. In zwölf Versuchen, die 41 Versuchstage umfaßten, betrug die durchschnittliche Nettoeinnahme (potentielle Energie der im Körper oxydierten Stoffe) 2246 Kal, die Nettoausgabe 2246 Kal, es bestand also völlige Uebereinstimmung. In zehn Versuchen mit 26 Versuchstagen mit besonders zusammengesetzter Kost betrug die durchschnittliche Einnahme 2290 Kal, die Ausgabe 2305 Kal, die Abweichung der beiden Werte also + 0,7%.

Die weiteren Versuche, in denen Arbeit geleistet wurde, ergaben folgende Resultate:

	Einnahme Kal	Ausgabe Kal
bei gewöhnlicher Kost		
20 Versuche, 65 Versuchstage	3748	3745
Unterschied — 0,1%		
bei besonderer Kost		
3 Versuche, 10 Versuchstage	3719	3702
Unterschied — 0,5%		

Faßt man alle 45 Versuchsserien mit 143 Versuchstagen zusammen, so betragen Einnahmen wie Ausgaben pro Tag im Durchschnitt 3481 Kal, der Unterschied ist geringer wie 1 Kal.

Die größten Abweichungen zwischen Einnahme und Ausgabe, die stets nur bei kurzdauernden Versuchen beobachtet wurden, betrugen + 2,1% und — 1,1%. Daß es sich bei diesen Abweichungen um unsystematische Fehler handelt, dafür spricht ihre etwa gleich häufige Abweichung in positivem und negativem Sinne.

3. Der zweite Hauptsatz. Die Möglichkeit der Umwandlung verschiedener Energieformen ineinander wird in der unbelebten Natur begrenzt durch eine einschränkende Bedingung, die als der zweite Hauptsatz der mechanischen Wärmetheorie, oder der Satz von der Zunahme der Entropie bezeichnet wird. Die Frage, ob auch dieser Satz für belebte Körper unbedingte Geltung hat, läßt sich nicht mit dem Hinweise auf seine axiomatische Sicherheit erledigen, wie wir es für den ersten Hauptsatz bei Mangel experimenteller Erfahrungen hätten tun können, sondern würde einer besonderen Prüfung bedürfen und eine solche liegt zur Zeit nicht vor. Man kann den Entropiesatz nach Boltzmann als einen Wahrscheinlichkeitssatz betrachten, und ihm die Form geben, daß man sagt, die Energieumwandlungen gehen stets in der Richtung vor sich, daß aus unwahrscheinlicheren Energieformen die wahrscheinlicheren entstehen. Die „wahrscheinlichste" Form der Energie ist in der Wärme — der ungeordneten Bewegung der Massenteile eines Körpers — gegeben, während jede geordnete Bewegung (Strahlung, Massenbewegung) unwahrscheinlicher ist und so geht bei jeder Umwandlung in irgendeine Energieform stets ein Teil in Wärme über und kann nicht mehr zurückgewonnen werden, die Energie wird, wie man sagt, zerstreut, sie wird vom Standpunkte der Möglichkeit weiterer Energieumwandlung entwertet.

Eine Wärmemaschine ist nur möglich, wenn ein Temperaturgefälle vorhanden ist, wobei der Energieaustausch in der Weise erfolgt, daß die Wärmeenergie von dem wärmeren zum kälteren Körper fließt. Der maximale Nutzeffekt, den eine solche Maschine erreichen kann, ist abhängig von der Differenz der absoluten Temperaturen der beiden Körper, zwischen denen der Energieaustausch erfolgt, und ist für den Fall eines Kreisprozesses $\frac{T_1 - T_2}{T_1}$, wenn T_1 und T_2 die Temperaturen der beiden Körper, vom absoluten Nullpunkt (—273° C) aus gerechnet, bedeuten.

Dieser maximale Nutzeffekt, der theoretisch in einem Kreisprozeß erreicht werden

Digitized by Google

kann, ist innerhalb eines Organismus niemals zu erzielen, denn die Bedingungen des Kreisprozesses erfordern auf bestimmte Strecken eine adiabatische, auf andere eine isotherme Zustandsänderung, die Bedingungen aber, unter denen die Energieumwandlungen innerhalb der Organismen erfolgen, sind meist dauernd diejenigen der Isothermie.

Bei allen absolut kleinen Organismen, dem ganzen Heer der Protisten, den Rotatorien, Copelaten, Copepoden usw. ist der Wärmeaustausch mit dem umgebenden Medium ein so vollständiger, daß die Bedingung der Isothermie, der Temperaturkonstanz, während des ganzen Prozesses in so vollkommener Weise gewährleistet ist, wie sie im Experiment kaum realisiert werden kann. Andererseits ist innerhalb der höchsten Klassen des Tierreichs, bei Säugetieren und Vögel ein Zustand durch physiologische Mechanismen geschaffen, den wir als Homoiothermie bezeichnen, d. h. die Temperatur dieser Tiere schwankt nur innerhalb so enger Grenzen, und in jedem Zeitmoment ist der Temperaturausgleich zwischen den einzelnen lebenden Teilen des Körpers ein so vollkommener, daß wir auch hier von Isothermie sprechen können. Die Körpertemperatur der absolut größeren Pflanzen und wirbellosen Tiere sowie der Fische, Amphibien und Reptilien schwankt zwar entsprechend der Außentemperatur innerhalb weiter Grenzen, aber auch bei ihnen kommt es nur höchst selten zu einer raschen und nennenswerten Aenderung der Temperatur einzelner Teilsysteme während eines rasch ablaufenden physiologischen Prozesses, so daß auch die Vorgänge in ihnen mit ziemlicher Annäherung als isotherm verlaufend betrachtet werden können. Nirgends finden wir dagegen bei Organismen Vorgänge, die mit einiger Annäherung als adiabatisch verlaufend betrachtet werden könnten, d. h. bei denen durch die Grenzen des Systems, in dem sich die Energieumwandlung vollzieht, während der Dauer des Vorganges keine nennenswerten Energiemengen hindurchträten.

Wenn wir nun auch keinen experimentellen Nachweis dafür haben, daß der Entropiesatz bei Organismen uneingeschränkte Geltung hat, so liegen andererseits ebensowenig Erfahrungen vor, die dafür sprächen, daß innerhalb der Organismen bestimmte Arten der Energieumwandlung, die in der belebten Natur unwahrscheinlich sind, durch geeignete Mechanismen zu „wahrscheinlichen" Vorgängen gemacht würden, so daß wir bis auf weiteres keinen Grund haben, an der Allgemeingültigkeit des zweiten Hauptsatzes in der belebten Natur zu zweifeln. Wir werden also im folgenden immer annehmen, daß eine Vermehrung der Entropie, wie sie bei allen Energieumwandelungen innerhalb der Organismen erfolgt, ebenso zu einer Zerstreuung und Entwertung der Energie führt, wie dies in der unbelebten Natur der Fall ist.

4. Die Energieformen, die für die Organismen eine Rolle spielen. Von allen uns bekannten Energieformen spielt, soviel wir wissen, nur eine keine nachweisbare Rolle in der Energetik der Organismen: die magnetische Energie. Es sind keinerlei Tatsachen bekannt, die auf eine Wirkung der Zufuhr magnetischer Energie zu einem lebenden System schließen ließen, und kein Organismus produziert „Magnetismus" oder ist imstande anderen Körpern magnetische Eigenschaften mitzuteilen. Dagegen spielen alle anderen Energieformen, die die Energetik des Unbelebten kennt, auch bei den Lebewesen eine Rolle. Um welche Energieformen es sich dabei handelt, mag eine kleine Uebersicht zeigen.

A. Mechanische Energiearten:
1. Volumenenergie
2. Flächenenergie
3. Distanzenergie
4. Bewegungsenergie.

B. Nichtmechanische Energiearten:
5. Wärme
6. Elektrische Energie
7. Strahlende Energie
8. Chemische Energie.

5. Die Energiezufuhr. Energie kann den Organismen auf verschiedene Weise zugeführt werden, zu einer Vermehrung ihrer Arbeitsfähigkeit kommt es aber nur bei Zufuhr von Licht, von chemischer Energie und — unter bestimmten Bedingungen — von mechanischer Energie. Betrachten wir systematisch die Erfolge, die die Zufuhr der verschiedenen Arten der Energie in bezug auf den Zuwachs an freier Energie einerseits, an Entropie andererseits bei den Organismen hat, so werden wir finden, daß in den meisten Fällen die freie Energie keine Vermehrung erfährt, sondern nur die Entropie.

Wir beginnen mit der Betrachtung der Zufuhr strahlender Energie, und zwar mit den Strahlen großer Wellenlänge, wie sie die strahlende Wärme darstellt. Es war nur ein Fall bekannt, in dem es schien, als ob die Zufuhr strahlender Wärme (ultraroter Strahlung) zu einer Vermehrung der freien Energie eines Systems führte: der Fall der Purpurbakterien, die im Ultrarot Kohlensäure zu assimilieren, d. h. Zucker aus Kohlensäure zu bilden, imstande sein sollten. Die genauere Untersuchung zeigte aber, daß eine derartige Wirkung nicht besteht (Molisch), so daß wir heute sagen müssen, strahlende Wärme ist nicht imstande die freie Energie eines lebenden Systems zu vermehren. Trotzdem übt strah-

Digitized by Google

lende Wärme physiologische Wirkungen aus, in dem sie z. B. die Wärmesinnesorgane der menschlichen Haut reizt. Hierbei wird aber nur die Entropie, nicht die freie Energie des isothermen Systems vermehrt, die Wärmestrahlen wirken verändernd auf die Geschwindigkeit des Ablaufs der Prozesse in den Sinneszellen, aber die Arbeitsfähigkeit dieser Elemente wird dadurch nicht erhöht. Man muß sich stets gegenwärtig halten, daß in den physikalisch scharf definierten Begriffen der Arbeit, der Arbeitsfähigkeit, der Energie, die Zeit nicht enthalten ist. Ob ein Meterkilogramm in einer Sekunde oder einer Stunde geleistet wird: die Arbeit ist dieselbe, was sich ändert, ist nur der „Effekt", die Arbeit pro Zeiteinheit, und nur diese ändert sich bei Zufuhr strahlender Wärme zu den Sinneselementen, während die Arbeitsfähigkeit bezw. die freie Energie keine Aenderung erfährt.

Wir müssen bei allen Arten der Energiezufuhr diesen Unterschied machen: die zugeführte Energie kann entweder dazu dienen, Arbeit zu leisten, und dadurch den Energiegehalt, die Arbeitsfähigkeit, des Organismus zu vermehren, oder sie kann zur Beschleunigung (oder Verlangsamung) von Prozessen dienen und hierbei erfolgt keine Vermehrung oder Verminderung der Energie. Sehr klar lassen sich diese Verhältnisse zeigen, wenn wir die Zufuhr von Lichtenergie zu den lebenden Systemen betrachten. Strahlende Energie, deren Wellenlänge zwischen 740 $\mu\mu$ und 420 $\mu\mu$ liegt, d. h. die dem für unser Auge sichtbaren Teil des Spektrum angehört, vermag in bestimmten lebenden Systemen Arbeit zu leisten und dadurch die Energie des Organismen zu vermehren. Die Organismen, an denen wir diesen Vorgang am besten beobachten können, sind die grünen Pflanzen.

Die Arbeit, welche das Licht leistet, besteht darin, daß es die Vereinigung von Kohlensäure (CO_2) und Wasser (H_2O) zu Zucker ($C_{12}H_6O_{12}$) bewirkt, die nur mit Energieaufwand möglich ist. Bei diesem Prozeß werden unter Aufwand einer Arbeit, die 673,74 Kal oder 288370 mkg äquivalent ist, aus 264 g Kohlensäure und 108 g Wasser gebildet: 180 g Zucker (1 g Molekül) und 192 g Sauerstoff nach der Formel

$$\underset{264\,g}{6CO_2} + \underset{108\,g}{6H_2O} + 673{,}74\,\text{Kal} = \underset{180\,g}{C_6H_{12}O_6} + \underset{192\,g}{12\,O.}$$

Wahrscheinlich verläuft dieser Prozeß in zwei Schritten, von denen nur der erste unter Energiezufuhr abläuft, während der zweite ohne solche erfolgt. Der erste Schritt ist die Bildung von Formaldehyd (CH_2O) aus Kohlensäure und Wasser nach der Formel:

$$\underset{44\,g}{CO_2} + \underset{18\,g}{H_2O} + 112{,}29\,\text{Kal} = \underset{30\,g}{CH_2O} + \underset{32\,g}{O_2}$$

Der zweite Prozeß, die Kondensation von 6 Mol. Formaldehyd zu 1 Mol Zucker hat von energetischem Standpunkte aus für uns kein Interesse.

Dieser photochemische Prozeß ist reversibel, auf seiner Umkehrung, bei der unter Oxydation von Zucker zu Kohlensäure und Wasser Energie gewonnen wird, beruht die Möglichkeit des Lebens auf der Erde in der Form, in der wir es zur Zeit beobachten. Es ist aber nur ein kleiner Bruchteil der gesamten sichtbaren Strahlung, der in diesem reversiblen Prozeß verbraucht wird, d. h. dessen Aequivalent zu einer Vermehrung der Arbeitsfähigkeit der Organismen führt. Die Schätzungen über die Größe dieses Anteils liegen zwischen 1 und 5 % der Strahlungsintensität der Sonne, so daß mehr als 95 % der zugeführten Lichtes auch in den grünen Pflanzen nicht zur Vermehrung der Energie ausgenutzt werden. Dieser Anteil geht zum Teil durch die grünen Blätter hindurch, zum Teil erleidet er die gewöhnliche Absorption, die das Licht in allen Körpern in mehr oder weniger hohem Maße trifft und wird hierbei in Wärme umgewandelt. Dieser Teil des Prozesses der Lichtzufuhr ist irreversibel und führt zu keiner Zunahme der freien Energie der Organismen, sondern nur zu einer Zunahme der Entropie nach dem allgemeinen Satze, daß der nicht umkehrbare Teil eines Prozesses mit einer Vermehrung der Entropie für die arbeitende Substanz verbunden ist.

Die Vermehrung der Energie der Organismen durch die Strahlung des sichtbaren Spektrums ist so wichtig, daß wir noch kurz auf die Frage eingehen müssen, welche Organismen das Vermögen haben auf diesem Wege ihre Arbeitsfähigkeit zu vermehren. In erster Linie sind alle diejenigen zu nennen, welche den Farbstoff der grünen Blätter, das Chlorophyll enthalten, von den Einzelligen (Flagellaten), Algen angefangen bis zu den höchsten Formen der dikotylen Gewächse. Außer dem Chlorophyll kennen wir aber noch eine Reihe anderer Farbstoffe, in deren Gegenwart der Prozeß des Energiegewinns unter Belichtung vor sich geht, und die als Chromophylle bezeichnet werden, so den Farbstoff der blaugrünen Algen, der Rotalgen und Braunalgen sowie der Tange.

Die Fähigkeit, Lichtenergie zur Vermehrung der Arbeitsfähigkeit zu verwenden, fehlt allen Bakterien und Pilzen und, wie wir heute noch behaupten müssen, allen Tieren, denn die anscheinende Fähigkeit einer Anzahl von Tieren, Kohlensäure wie die Pflanzen zu zerlegen, beruht nur auf einer Symbiose (s. den Artikel „Symbiose") von Algen mit Tieren und die Angaben, daß auch Insekten die Fähigkeit der Kohlensäureassimilation hätten, konnten nicht bestätigt werden.

Digitized by Google

Betrachten wir nun die Vorgänge, welche stattfinden, wenn das Licht andere lebende Systeme trifft, als diejenigen, welche einen Chromophyllapparat besitzen, so liegen die energetischen Verhältnisse ganz anders. So weit das Licht als solches überhaupt nachweisbare Wirkungen ausübt (also abgesehen von der einfachen Erwärmung durch Lichtabsorption) handelt es sich nur um Beschleunigungen von Prozessen, die auch ohne Lichteinfuhr, wenn auch anders, langsamer, ablaufen. Alle diese Prozesse sind nicht umkehrbar, und vermehren daher nur die Entropie, nicht die Energie der lebenden Systeme.

Für den kurzwelligen Teil des Spektrums, das Ultraviolett, endlich sind nur Wirkungen dieser zweiten Art bekannt, kein Organismus ist bisher aufgefunden worden, der ultraviolette Strahlung in einem reversiblen Prozeß auszunutzen vermöchte.

Ebenso kurz können wir uns fassen inbezug auf die Elektrizität und die Wärme. Die zahlreichen Reizwirkungen, die diese beiden Faktoren in Organismen auslösen, führen nie zur Vermehrung der Arbeitsfähigkeit, d. h. es wird der Gehalt der Organismen an freier Energie bei Zufuhr von Elektrizität und Wärme nicht vermehrt.

Von den nicht mechanischen Arten der Energie bleibt jetzt nur noch die chemische Energie übrig, und ihre Zufuhr spielt für die Organismen die größte Rolle.

Der Kreislauf der Energie, der mit der Synthese des Zuckers aus Kohlensäure und Wasser beginnt, vollzieht sich fast ausschließlich in der Art, daß in Form chemischer Energie die Zufuhr zu den einzelnen Organismen erfolgt, und auch abgesehen von den Produkten der reversiblen Lichtwirkungen in den grünen Pflanzen wird einzelnen Organismengruppen chemische Energie zugeführt. Wir bezeichnen Stoffe, die den Energiegehalt der Organismen vermehren, als Nährstoffe und in der Lehre vom Stoffwechsel (s. den Artikel „Stoffwechsel") wird im einzelnen gezeigt, welche Stoffe geeignet sind, eine solche Vermehrung der Energie zu bewirken. Hier sei nur darauf hingewiesen, daß die Vermehrung des Energiegehaltes eines Organismus, der Stoffe aufnimmt, durch die Verbrennungswärme des aufgenommenen Stoffes gemessen werden kann, vorausgesetzt, daß der Organismus imstande ist, den zugeführten Stoff vollständig zu oxydieren.

So erfährt z. B. ein Organismus bei Zufuhr von 1 g der folgenden Stoffe eine Energiezunahme, die in Kal (Wärmeeinheiten) bezw. Meterkilogramm (Arbeitseinheiten) ausgedrückt, folgende Werte erreicht.

Zucker	3,74 Kal.	= 1590 mkg
Stärke	4,18 Kal.	= 1780 mkg
Legumin	5,79 Kal.	= 2460 mkg
Tierfett	9,50 Kal.	= 4050 mkg
Sumpfgas	13,20 Kal.	= 5620 mkg

Das an letzter Stelle angeführte Sumpfgas bedeutet freilich nur für ganz bestimmte Organismen (Bakterien) eine Vermehrung des Energiegehaltes, und ebenso sind die folgenden Stoffe nur für einzelne oder einige wenige Organismen als Energiequellen verwertbar, doch zeigt die Möglichkeit der Verwendung solcher Verbindungen gut das Prinzip der Energiezufuhr durch chemische Verbindungen, die eine hohe Arbeitsfähigkeit, d. h. in diesem Falle Oxydationsfähigkeit, besitzen, z. B.:

Wasserstoff	0,68 Kal.	= 290 mkg
Ammoniak	0,98 Kal.	= 418 mkg
Schwefel	2,16 Kal.	= 920 mkg

Es muß zur Gewinnung dieser Energiemenge der Wasserstoff zu Wasser, das Ammoniak zu Salpetersäure, der Schwefel zu Schwefelsäure oxydiert werden.

Auf die Frage, inwieweit durch Zufuhr mechanischer Energie die Arbeitsfähigkeit lebender Systeme vermehrt werden kann, können wir nur eine mangelhafte Antwort geben. Es ist nur ein typischer Fall bekannt, in dem die Bewegungsenergie, die von außen zugeführt wird, zu einer Vermehrung der Arbeitsfähigkeit von Organismen führt, der Fall des Segelfluges der Vögel.

Es sind zwei durchaus verschiedene Arten des Segelfluges bekannt (Lanchester). Die einfachste Art ist diejenige, die Vögel (und auch Schmetterlinge) in aufsteigenden Luftströmen ausüben. Der aufsteigende Strom, der nicht selten Geschwindigkeiten von 1 bis 2 m/sec erreicht, erteilt den im Gleitfluge dahinschwebenden Tieren dauernd eine Beschleunigung, die derjenigen der Erdschwere entgegengesetzt gerichtet ist. Die Kraft, die hierbei wirkt, ist gleich der Masse des Vogels mal der Beschleunigung, die Arbeit, welche der Wind leistet, ist gleich dem Gewicht des Vogels mal der Strecke, die er gehoben wird, und der Energiegehalt des Tieres wird um diesen letzten Wert vermehrt.

Wenn z. B. ein Kondor von 30 kg Gewicht durch aufsteigende Luftströme um 1000 m gehoben wird, so erfährt sein Energiegehalt, seine Arbeitsfähigkeit, einen Zuwachs von 30000 mkg. Sollte der Kondor durch Verbrennung von Körperstoffen diese Energie aufbringen, so müßte er solche im Brennwert von 700 Kal umsetzen. Da aber der Nutzeffekt seiner Muskelmaschine nur etwa $^1/_3$ ist (s. unten), würde er sogar 2100 Kal aufwenden müssen, d. h. etwa 490 g Körperstoffe verbrennen müssen, um nur die Hebearbeit zu leisten, die ihm der aufsteigende Luftstrom erspart.

Die zweite Art des Segelfluges, der sogenannte „dynamische Segelflug" wird dort

ausgeführt, wo keine aufsteigenden Luftströme vorkommen, und beruht auf einer Ausnutzung der Pulsationen des Windes, der Geschwindigkeitsänderungen, die jeder Wind innerhalb kurzer Zeiträume zeigt, und die im allgemeinen um so bedeutender sind, je höher die mittlere Windgeschwindigkeit ist.

Beide Arten des Segelfluges spielen praktisch als Energiequellen für die betreffenden Tiere eine höchst bedeutsame Rolle, während in einer Gesamtbilanz der Energiemengen, die lebenden Organismen zugeführt und von ihnen umgewandelt werden, dieser Posten verschwindend klein ist, gegenüber der Energiezufuhr durch Licht. Immerhin beanspruchen sie ein gewisses Interesse als Beispiele, wie der Energiegehalt eines Organismus vermehrt werden kann. Die Erkenntnisse dieser Möglichkeit der Ausnutzung der „inneren Arbeit" des Windes und der aufsteigenden Luftströme durch die Vögel (und Schmetterlinge) legt die Frage nahe, ob nicht auch entsprechende Bewegungen des Wassers, Turbulenzbewegungen einerseits, aufsteigende Wasserströme andererseits, für Wassertiere als Energiequelle dienen könnten. Dies ist in der Tat für viele planktonisch lebende Wassertiere der Fall, was besonderes auffällig bei solchen Formen ist, denen Bewegungsorgane fehlen, und die trotzdem in bestimmten Wasserschichten schweben, doch ist Genaueres hierüber nicht bekannt. Auch bei manchen Fischen, die wie Forellen, Lachse, Schmerlen an bestimmten Stellen unterhalb von Wasserfällen im Wasser stehen, ist an die Analogie mit den im Winde stehenden Vögeln zu denken, und ist die Frage diskutierbar, ob hier etwa eine Ausnutzung turbulenter Bewegungen oder Gegenströmungen den Tieren es ermöglicht in einem sonst reißenden Wasser mit minimaler Muskelleistung sich zu erhalten; doch ist nichts Positives über eine derartige Ausnutzung der Bewegungsenergie des Wassers bekannt.

6. Die Energieumwandlungen. Wie die Lehre von der Energieeinfuhr zeigt, erfolgt eine Vermehrung der Arbeitsfähigkeit der Organismen durch Zufuhr von Licht, das zur Bildung von Zucker verwendet wird und durch Aufnahme von Stoffen (Nährstoffen), die chemische Energie enthalten. In beiden Fällen ist dem Organismus als Ausgangsmaterial für die weiteren Umwandlungen chemische Energie gegeben und die Lehre von den Energieumwandlungen in Organismen ist generell die Lehre von der Umwandelung chemischer Energie in andere Energieformen

Aus dem Rahmen dieser Aufgabe fällt nur das Schicksal des Energiezuwachses heraus, den die Tiere durch Ausnutzung der Bewegungsenergie des Mediums, z. B im Segelfluge, gewinnen. Seine Umwandlung zu verfolgen ist sehr einfach: Die potentielle Energie, die das Tier dadurch gewinnt, daß es gehoben wird, gibt es beständig wieder aus, indem es sie beim Gleiten durch die Luft in kinetische Energie umwandelt.

Der Nutzeffekt ist bei dieser Umwandlung 100%: den ganzen Energiezuwachs, den der Vogel durch Hebung erfahren hat, gibt er im Gleitfluge ab.

Wenn wir die verschiedenen Prozesse betrachten, in denen chemische Energie in andere Energieformen umgewandelt wird, so können wir nirgends so weit in das innere Getriebe derselben eindringen, daß wir den Mechanismus des Vorganges darzustellen vermöchten, vielmehr wird es sich um eine mehr äußerliche Beschreibung der Umwandelungsarten handeln. Von besonderem theoretischem Interesse ist dabei der Wert für den Nutzeffekt der Energieumwandelung, d. h. die Angabe über den prozentualen Anteil der umgesetzten Gesamtenergie, der nicht in Wärme umgewandelt wird, d. h. der nicht zur Vermehrung der Entropie benutzt wird.

6a) Produktion chemischer Energie. Die chemische Energie der Nahrung wird in allen Organismen in zweierlei Art umgewandelt; es werden einmal die Körperstoffe aus ihnen aufgebaut, und zwar sowohl diejenigen, die den dauernden Bestand der Organismen bilden, wie auch jene, die als Sekrete abgegeben werden und außerhalb der Organismen Leistungen vollbringen, und andererseits werden die Nahrungsstoffe im sogenannten Betriebsstoffwechsel (s. den Artikel „Stoffwechsel, allgemeine Physiologie") gespalten oder oxydiert und geben so ihre Energie ab. Vom Standpunkte der allgemeinen Energetik interessiert uns hierbei vor allem die Frage, welchen Aufwand von Energie ein Organismus braucht, um einen bestimmten Körper- oder Sekretstoff zu produzieren. Es wird sich darum handeln das Verhältnis der Stoffmengen, die im Betriebsstoffwechsel umgesetzt werden, zu jenen zu ermitteln, die als Anwachs, als Vermehrung der Körpersubstanzen, zur Beobachtung kommen. Tangl hat die Energiemenge, die hierbei im Betriebsstoffwechsel umgesetzt wird, als „Entwickelungsarbeit" bezeichnet, doch ist es nicht ohne Bedenken, den ganzen Umsatz im Betriebsstoffwechsel als für den Aufbau der Körperstoffe verausgabt anzusehen.

Als Einheit der aufgebauten Körperstoffe dürfen wir in diesem Zusammenhange nicht die Masseneinheit wählen, sondern diejenige Menge, deren Brennwert (Energiegehalt) eine bestimmte Größe repräsentiert, z. B. 1 Kal. = 427 mkg.

Der geringste Energieaufwand zur Produktion dieser Menge Körperstoffe ist in

Digitized by Google

den Fällen nötig, in denen arteigene Stoffe zum Aufbau der Körperstoffe verwandt werden, also z. B. bei der Entwickelung des Hühnchens im Ei, bei der Metamorphose der Fliegenpuppe zum Imago usw. In diesen Fällen erscheint bei einem Gesamtumsatz von 1,56 bezw. 1,528 Kal. schon 1 Kal. in den aufgebauten Körperstoffen, der Nutzeffekt des Prozesses beträgt also 64 bis 66%. Wird artfremde aber gut ausnutzbare Nahrung verwendet, so ist der Nutzeffekt stets kleiner als 50%, wie dies für eine Reihe von Pilzen, Hefen und Bakterien ermittelt ist. Bei weniger geeigneter Nahrung wird der Nutzeffekt geringer. Für einen Schimmelpilz (Aspergillus) beträgt er z. B. auf Zucker 48%, auf Glycerin dagegen nur 19,8%, der Umbau des Glycerins zu Körperstoffen erfordert einen viel größeren Energieaufwand als jener des Zuckers.

6b) Produktion elektrischer Energie. Die Produktion nachweisbarer elektrischer Potentialdifferenzen ist etwas ungemein verbreitetes im Organismenreich. Man kann ganz allgemein sagen, daß eine Stelle, die sich in gesteigerter Tätigkeit befindet negativ gegen die Stellen relativer Ruhe wird, d. h. gegen die Stellen, an denen nur der Grundumsatz abläuft. Ueber diese — methodisch ganz außerordentlich wichtigen — Verhältnisse, wird an anderer Stelle berichtet (vgl. den Artikel „Elektrizitätsproduktion").

Hier handelt es sich darum, ob wir uns eine Vorstellung darüber machen können, wie diese Umwandelung chemischer Energie in elektrische erfolgt und welchen Anteil an den gesamten Energieumwandelungen in den Organismen die Elektrizitätsproduktion nimmt. Um mit der letzteren Frage zu beginnen, so fehlen uns zahlenmäßige Angaben hierüber völlig, aber wir können mit Sicherheit sagen, daß es nur ein äußerst geringer Bruchteil des Gesamtumsatzes ist, der in Form elektrischer Energie auftritt. Selbst bei den elektrischen Organen der elektrischen Fische (Zitteraal, Zitterwels, Zitterrochen), bei denen die Elektrizitätsproduktion zu einem so auffälligen Phänomen wird, dürfte ein Vergleich der pro Zeiteinheit umgesetzten Stoffmenge mit der gleichzeitig produzierten Elektrizität einen ungemein geringen Nutzeffekt für diese Art der Energieumwandlung ergeben.

Wenn wir den Vorgang der Elektrizitätsproduktion in den elektrischen Organen, in denen sie so besonders handgreiflich hervortritt, etwas näher verfolgen, um einen Einblick in den Mechanismus der Energieumwandelung zu erhalten, so ist zunächst zu konstatieren, daß die Elektrizitätsproduktion ungemein rasch zu ihrem Maximum ansteigt, das sie 2 bis 3 σ ($1\ \sigma = {}^{1}/_{1000}$ Sekunde) nach dem Beginn erreicht. Diese Zeit des Anstieges der Produktion ist in hohem Maße von der Temperatur abhängig, so daß wenn der Anstieg bei 35° in 1,2 σ beendet ist, er bei 20° schon 4,0 σ erfordert. Es entspricht das einer Beschleunigung um das 2,2fache für je 10°, oder, wie man sagt, der Faktor Q_{10} ist für diesen Prozeß = 2,2, ein Wert, der ganz denjenigen entspricht, die van't Hoff für die Beschleunigung chemischer Prozesse durch Temperatursteigerung fand. Unterhalb 20° wird der Faktor allerdings wesentlich größer.

Wenn wir hieraus den Schluß ziehen, daß chemische Umsetzungen für die Produktion der elektrischen Energie eine wesentliche Bedingung sind, so müssen wir erwarten, daß diese Umsetzungen, die exotherm verlaufen, zu einer Erwärmung der elektrischen Organe führen. Es ist nun für die Theorie der Energieumwandelung bei der Elektrizitätsproduktion von fundamentaler Bedeutung, daß Bernstein und Tschermak durchaus nicht in allen Fällen am tätigen elektrischen Organ eine solche Erwärmung nachweisen konnten. Bald trat eine gewisse Erwärmung ein, bald eine sichere Abkühlung, die bis zu 0,00044° C betrug.

Wir müssen hieraus den Schluß ziehen, daß der Prozeß der Elektrizitätsproduktion ein endothermer ist, daß er mit Abkühlung vor sich geht, und daß wir in der manifesten Temperaturänderung des Organes nur die algebraische Summe aus der Erwärmung infolge des gesteigerten Betriebswechsels und der Abkühlung beobachten, die bei der Elektrizitätsproduktion selbst erfolgt. Eine derartige Abkühlung ist charakteristisch für sogenannte Konzentrationsketten, und wir dürfen uns dementsprechend die Vorstellung machen, daß durch die chemischen Umsetzungen im Betriebsstoffwechsel eine Konzentrationskette geschaffen wird, deren Elektrizitätsproduktion wir dann beobachten. Ein weiter ins einzelne gehendes Bild der Energieumwandelungen bei der Elektrizitätsproduktion können wir zur Zeit nicht entwerfen.

6c) Die Produktion strahlender Energie. Noch weniger können wir über den Mechanismus der Produktion strahlender Energie bei den Umsetzungen in Organismen sagen, kennen wir doch auch für die leuchtenden Reaktionen, die in der unbelebten Natur vorkommen, durchaus nicht die Bedingungen, die bei ihnen die Emission von Licht ermöglichen. Das Tatsächliche über Lichtproduktion bei Organismen ist an anderem Orte mitgeteilt (s. den Artikel „Lichtproduktion durch Organismen"). Es sind anscheinend stets Oxydationen, die mit der Emission von Licht verbunden sind und so interessant dies Phänomen dem Biologen ist, so kann die Produktion leuchtender Strahlen

Digitized by Google

in einer allgemeinen Energetik der Organismen nur eine ganz untergeordnete Rolle spielen, da es — das läßt sich schon ohne nähere Untersuchungen sagen — nur ein ganz minimaler Teil der bei den leuchtenden Reaktionen umgesetzten Gesamtenergie ist, der als Licht erscheint.

6d) Die Produktion mechanischer Energie. Von allen Umwandelungen chemischer Energie in andere Energiearten ist diejenige in die verschiedenen Formen mechanischer Energie am häufigsten untersucht worden.

Die Produktion von Volumenenergie tritt am auffälligsten in den Erscheinungen des Turgors der Pflanzenzellen hervor, der durch die osmotische Leistung der im Zellsaft gelösten Stoffe zustande kommt.

Formale Bedingung für das Zustandekommen des Turgors ist die Undurchlässigkeit der Plasmahaut für diejenigen Stoffe, welche den osmotischen Druck erzeugen. Die Herstellung dieser Undurchlässigkeit ist ein Werk des Baustoffwechsels der lebendigen Substanz. Die Stoffe, welche osmotisch wirksam sind, können anorganische Salze oder organische Verbindungen sein. So werden z. B. 41 % des osmotischen Druckes in den Zellen des Sproßgipfels der Sonnenblume (Helianthus tuberosus) durch salpetersaures Kalium erzeugt. Bei der Zuckerrübe erhält der Rohrzucker, bei der Küchenzwiebel der Traubenzucker mehr als die Hälfte des osmotischen Druckes, bei den Blattstielen von Rhabarber (Rheum) die Oxalsäure 62 % des Gesamtdruckes.

Die Leistung der Zellen besteht darin, diese osmotisch wirksamen Stoffe, die entweder als solche von außen aufgenommen oder in der Zelle synthetisch erzeugt worden sind, in die Flüssigkeitstropfen (Vakuolen) auszuscheiden, in denen sie gelöst ihre osmotischen Wirkungen entfalten. Wie groß die Menge chemischer Energie ist, die aufgewendet werden muß, um eine bestimmte Menge osmotisch wirksamer Stoffe in den Raum der Vakuolen hineinzubringen, ist unbekannt.

Der osmotische Energiegehalt der Zellen ist ein relativ sehr bedeutender. Die Volumenenergie (osmotische Energie) wird gemessen durch das Produkt von Druck und Volumen. Die Höhe des osmotischen Druckes beträgt bei Landpflanzen 5 bis 11 Atmosphären (1 Atm. = 1 kg pro cm^2), was der osmotischen Leistung einer Kalisalpeterlösung von 1,5 bis 3,0 % entspricht. Bei den Meerpflanzen ist der Druck um 12 bis 13 Atmosphären höher, die Druckdifferenz gegenüber dem umgebenden Medium ist infolgedessen annähernd dieselbe. Ungewöhnlich hohe Drucke können manche Pilze erzeugen, die noch in Lösungen von 38 % Natriumnitrat wachsen können, was einem Druck von 157 Atm. entspricht.

Die Umwandelung chemischer Energie in Distanzenergie tritt uns in jenen Fällen in besonders handgreiflicher Weise entgegen, wo die Organismen Gebilde mit besonderen elastischen Eigenschaften produzieren. Solche festen, elastischen Bestandteile finden sich überall in lebenden Systemen und ihre Gegenwart ermöglicht es der flüssigen lebendigen Substanz alle möglichen Formen anzunehmen, die von der des Tropfens weit abweichen. Da wir über den Energieaufwand, den die Bildung einer elastischen Faser, einer Fischbeinspange, einer elastischen Zellhaut erfordert, nicht das geringste wissen, so könnten wir nur die elastischen Eigenschaften der hieraufhin untersuchten elastischen Strukturen aufzählen, was für die Lehre von den Energieumwandelungen aber völlig uninteressant wäre und daher vermieden sei.

Am deutlichsten tritt die Umwandelung chemischer Energie in mechanische zutage, wenn Organismen aktive Bewegungen ausführen, wenn sie äußere Arbeit leisten, die ja stets in der Weise geleistet wird, daß die Bewegungsmechanismen gegen einen äußeren Widerstand wirken.

Aus den oben erwähnten Versuchen zur Bestätigung des ersten Hauptsatzes der mechanischen Wärmetheorie war schon der Unterschied in der Größe des Umsatzes bei ruhenden und (leicht) arbeitenden Menschen zu ersehen, denn während die ersteren im Gesamtdurchschnitt pro Tag 2275 Kal verbrauchten, setzen die arbeitenden Versuchspersonen 3723 Kal. pro Tag um. In noch feinerer Weise läßt sich die Steigerung des Umsatzes bei Muskelarbeit demonstrieren, wenn man nach den Methoden von Zuntz in kurzdauernden Versuchen den Sauerstoffverbrauch oder die Kohlensäureproduktion eines Menschen bei völliger Muskelruhe und bei bestimmten Bewegungen vergleicht. So scheidet z. B. bei völliger („vorsätzlicher") Muskelruhe ein Mensch 20,7 g Kohlensäure in der Stunde aus, bei gewöhnlicher Bettruhe schon 24,8 g und bei sogenannter „Zimmerruhe" bei der ruhiges Sitzen mit leichter Beschäftigung (Lesen, Schreiben, An- und Ausziehen usw.) ohne eigentliche Arbeitsleistung abwechselt, sogar 33,1 g, d. h. 50 bis 60 % mehr, als im Grundumsatz. Langsames Heben und Senken eines unbelasteten Armes, 2 bis 3 mal in der Minute steigert den Sauerstoffverbrauch um 10 bis 20 %.

Hier sehen wir in der allerdeutlichsten Weise, wie die chemische Energie der Nahrung in die Bewegungsenergie umgesetzt wird und wir können in quantitativ durchgeführten Versuchen auch angeben, mit welchem Nutzeffekt diese Umwandelung erfolgt.

Läßt man die Versuchsperson, bezw. das

Digitized by Google

Versuchstier einerseits auf ebener, andererseits auf leicht geneigter Bahn gehen, so besteht die Arbeit, welche geleistet wird, — im ersten Falle nur in der Bewegung der Glieder zum Gange, im zweiten Falle außerdem in einer Hebung des Körpers um einen bestimmten, meßbaren Betrag. Ermittelt man in beiden Fällen durch Bestimmung des Sauerstoffverbrauchs und der Kohlensäureproduktion den Energieumsatz, so gibt die Differenz beider Werte diejenige Energiemenge, welche erforderlich war, um die Hebearbeit zu leisten, woraus sich ohne weiteres der Energieumsatz berechnen läßt, der nötig ist, um die Hebearbeit von 1 mkg zu leisten.

In dieser Weise wurden z. B. folgende Werte gewonnen:

Tierart	arbeitendes Gewicht kg	Energieverbrauch für 1 mkg Steigarbeit mkg
Hund . . .	26,9	3,10
Pferd . . .	456,8	2,91
Mensch . .	76,0	2,80

Es wird also bei allen drei untersuchten Tieren etwa dreimal soviel Energie umgesetzt, als in der Steigarbeit in nutzbarer Form zur Verwendung kommt, und man pflegt zu sagen, der Wirkungsgrad oder Nutzeffekt der Muskelmaschine beträgt ca. 33% (32,3 bis 35,7%).

Diesen Wert des Nutzeffektes der Muskelmaschine, der für die theoretischen Vorstellungen über die Art der Energieumwandelungen im Muskel wichtig ist, kann man auch auf andere Weise bestimmen. Läßt man einen aus dem Körper herausgeschnittenen Muskel Arbeit von meßbarer Größe leisten, und bestimmt gleichzeitig die gebildete Wärmemenge, so ergibt sich gleichfalls der Anteil der Gesamtenergie, der als Bewegungsenergie erscheint. In solchen Versuchen kann der Wirkungsgrad auf 57% steigen, d. h. nur 0,43 der umgesetzten Gesamtenergie erscheinen als Wärme, 0,57 als nach außen geleistete Arbeit.

Diese Tatsache schließt sogleich einen denkbaren Fall der Umwandlung chemischer Energie in mechanische aus: die Umwandlung auf dem Wege über die Wärme. Für diese Art der Umwandlung, wie sie in unseren Dampfmaschinen und Explosionsmotoren erfolgt, ist der Wirkungsgrad um so größer, je höher die auftretenden Temperaturdifferenzen sind (s. S. 500). Der Wirkungsgrad, den man z. B. bei einem umkehrbaren Kreisprozeß (Carnot) erhalten kann, wenn die Temperaturdifferenz 100° beträgt, ist nur 0,268 der umgesetzten Gesamtenergie. Die Temperaturerhöhung tätiger Muskeln beträgt aber nur Tausendstel eines Grades, und so ist ohne weiteres klar, daß bei dem erwähnten hohen Wirkungsgrad, der Muskel nicht nach dem Prinzip einer Wärmemaschine arbeiten kann. Ein weiteres Moment, das die Energieumwandlungen im Muskel charakterisiert, ist der Temperaturkoeffizient der einzelnen Prozesse, die in ihm ablaufen. Die chemischen Prozesse, die in seinem Stoffwechsel ablaufen, haben einen positiven Temperaturkoeffizienten, der — wie für chemische Reaktionen gewöhnlich — für 10° etwa 2 bis 3 beträgt. Dagegen ist es von höchstem Interesse, daß die Kraft, mit welcher die Verkürzung im Muskel angestrebt wird, einen negativen Temperaturkoeffizienten hat. Die Spannung, die derselbe Muskel bei verschiedenen Temperaturen erzeugt, beträgt z. B.

$$\left.\begin{array}{l}\text{bei } 0^\circ\ 375\ \text{g}\\ \text{bei } 18^\circ\ 205\ \text{g}\end{array}\right\} K_{10} = -0{,}2518.$$

Da die chemischen Prozesse im Muskel alle einen positiven Temperaturkoeffizienten haben, so wird der negative Koeffizient des physikalischen Prozesses der Umwandelung chemischer in mechanische Energie vielfach verdeckt. Von den Energieformen, die für die Umwandlungen in der Muskelmaschine in Betracht kommen, Oberflächenenergie und Volumenenergie, hat nun die erstere einen negativen Temperaturkoeffizienten, so daß wir ihrer Beteiligung an den Energieumwandelungen im Muskel eine wesentliche Rolle zusprechen müssen. In einer allgemeinen Energetik müssen wir uns mit diesen Andeutungen über das Prinzip der Energieumwandlungen im Muskel begnügen, da die genauere Analyse des vitalen Geschehens im kontrahierten Muskel in das Gebiet der Muskelphysiologie gehört (s. den Artikel „Muskeln, allgemeine Physiologie").

Die Flimmerbewegung und amöboide Bewegung geben keine neuen Gesichtspunkte für die Lehre von der Umwandlung chemischer Energie in Bewegung, und auch auf die Bewegungen durch Turgorschwankungen, wie sie bei Pflanzen vielfach vorkommen und sehr eingehend analysiert sind, können wir hier nicht näher eingehen.

6e) Produktion von Wärme. Wärme entsteht bei allen chemischen Umsetzungen, welche im Betriebsstoffwechsel der Organismen ablaufen, als Nebenprodukt. Für die große Mehrzahl der Tiere und Pflanzen ist die Produktion dieser Energieform funktionell bedeutungslos, nur bei Säugetieren und Vögeln gewinnt sie eine lebenswichtige Bedeutung. Arbeit leistet diese Energieform innerhalb der Organismen nicht, wenigstens kennen wir keinen Mechanismus, den wir als Wärmemaschine ansprechen dürfen (Näheres über Wärmeproduktion bei Tieren siehe im Artikel „Wärmehaushalt der Organismen").

Digitized by Google

7. Die Energieabgabe. Die Lehre von der Energieabgabe der Organismen gehört wesentlich in das Gebiet der speziellen Energetik. In den nach außen entleerten Sekreten wird chemische Energie abgegeben. Elektrische Energie geben nur die wenigen elektrischen Tiere — eine Anzahl Selachier, Teleostier und anscheinend eine Lungenschnecke (Daudebardia) — nach außen ab, bei allen anderen Organismen gleichen sich die entstehenden Potentialdifferenzen innerhalb der Organismen aus.

Für die Abgabe strahlender Energie ist — soweit es sich um die Strahlen des sichtbaren Spektrums handelt — die Durchsichtigkeit der Gewebe eine notwendige Bedingung und in den Leuchtorganen haben wir eine Reihe von Mechanismen, die diese Abgabe nach außen begünstigen. Dunkle Wärmestrahlen gibt jeder Körper ab, der wärmer ist, als seine Umgebung.

Die Lehre von der Abgabe mechanischer Energie nach außen würde wesentlich auf eine Darstellung der Bewegungsmechanismen herauslaufen (vgl. hierüber den Artikel „Bewegung, spezielle Physiologie"). Die Wärmeabgabe, die ja für den Haushalt des Warmblüterkörpers von hoher Bedeutung ist, erfolgt teils durch Strahlung, teils durch Leitung und teils durch Wasserverdunstung, die durch die Konvektionsströme der Luft stark erhöht werden kann, doch haben alle diese Dinge nur ein spezielles, vor allem hygienisches Interesse.

Literatur. **W. Pfeffer,** *Pflanzenphysiologie. Bd. 2. Leipzig 1901—1904.* — **Rubner,** *Gesetze des Energieverbrauchs bei der Ernährung. Leipzig 1902.* — **W. O. Atwater,** *Neue Versuche über Stoff- und Kraftwechsel im menschlichen Körper. In: Ergebnisse der Physiologie. Bd. 3. 1904. S. 497—622.* — **Adolf Magnus-Levy,** *Physiologie des Stoffwechsels im Handbuch der Pathologie des Stoffwechsels. Bd. 1. Berlin 1906.* — **Bernstein und Tschermak,** *Untersuchungen zur Thermodynamik bioelektrischer Ströme. Pflügers Arch. Bd. 112. 1906. S. 439 bis 521.* — **M. v. Frey,** *Allgemeine Physiologie der quergestreiften Muskeln. Nagel's Handbuch der Physiologie des Menschen. Bd. 4. 1907.* — **K. Moltsch,** *Purpurbakterien. Jena 1907.* — **F. Tangl,** *Beiträge zur Energetik der Ontogenese I—V. Pflügers Arch. Bd. 93—121. 1903—1908.* — **J. Bernstein,** *Zur Thermodynamik der Muskelkontraktion I.* — *Pflügers Arch. Bd. 122. 1908. S. 129—185.* — **M. Verworn,** *Allgemeine Physiologie. V. Aufl. Jena 1909.* — **S. Garten,** *Elektrizitätsproduktion in Winterstein's Handbuch der vergleichenden Physiologie. Jena 1910.* — **Lanchester,** *Akrodynamik. Deutsche Ausgabe. Bd. 1, 1909. Bd. 2, 1911.* — **A. Pütter,** *Vergleichende Physiologie. Jena 1911.*

A. **Pütter.**

Energielehre.

1. Der Energiebegriff: a) Mechanische Energie: α) Grundlegende Prinzipien. β) Eigenenergie und erster Hauptsatz. Kreisprozeß. γ) Kinetische und potentielle Energie. b) Wärmeenergie. Wärmeäquivalent. Robert Mayers Ansatz. c) Elektrische Energie. Strahlende Energie. Energiequantum. Wanderung der Energie. d) Andere Energieformen. Energiehaushalt der Erde. 2. Der Entropiebegriff: a) Isotherme, Adiabate und Entropie der Gase. b) Prinzipe von Carnot, Thomson. Umkehrbarkeit. c) Entropiezunahme. Zweiter Hauptsatz. d) Kollektive Energie, Zerstreuung und Entwertung der Energie. Unordnung. Wahrscheinlichkeit und Entropie. 3. Die Gleichartigkeit der Energieformen: a) Intensität und Extensität. b) Freie Energie. c) Abschluß.

Als Energielehre oder unter dem von Rankine herrührenden Namen Energetik faßt man alle Betrachtungsweisen der theoretischen Naturwissenschaft zusammen, die jeden Naturvorgang als Umformung der Energie ansehen. Ein Vorgang wird also energetisch betrachtet, wenn die Aufmerksamkeit darauf gerichtet wird, daß während seines Verlaufs eine gewisse Leistungsfähigkeit ihre Form wandelt, ohne ihren Betrag zu ändern. — In ihrer weiteren Entwickelung stellt sich die Energetik die Aufgabe, zu zeigen, daß überhaupt alles, was wir an einem Vorgang quantitativ festzustellen vermögen, also alles, was Gegenstand der theoretischen Naturforschung sein kann, Energieumformung ist. — Und in ihrer vorgeschrittensten Entwickelungsstufe behauptet die Energetik dasselbe vom Geschehen überhaupt und erhebt den Anspruch, mehr zu sein als eine Art der Naturbetrachtung, nicht nur die einzig berechtigte Auffassung der Natur, sondern geradezu die einzig berechtigte Auffassung der Welt.

1. Der Energiebegriff. **1a) Mechanische Energie.** α) Grundlegende Prinzipien. Geschichtlich nahmen diese hochzielenden Ideen ihren festen Ausgangspunkt von dem alten Satze, der als goldene Regel der Mechanik bezeichnet wird: Bei keiner rein mechanischen Vorrichtung kann im ganzen Arbeit gewonnen oder verloren werden, wenn unter Arbeit einer Kraft K nach einem Wege s das Produkt des Weges in die nach ihm genommene Kraftkomponente $K.\cos(K,s)$ verstanden wird: $K.s.\cos(K,s)$. So kann bei einer sogenannten einfachen Maschine, bei der nur zwei Kräfte in Betracht kommen, die als Kraft und Last unterschieden werden, wohl die Last weit größer sein, als die zu ihrer Ueberwindung erforderte Kraft, dafür ist dann aber der Weg der Last in dem Maße kleiner, als der der Kraft, daß die beiderseitigen Arbeiten

Digitized by Google

sich tilgen oder die Kraft soviel Arbeit leistet, als die Last verbraucht.

Daß sich die goldene Regel in der geschichtlichen Entwickelung der Mechanik zu einem die theoretische Mechanik beherrschenden Prinzip vertieft hat, dem Prinzip der virtuellen Geschwindigkeiten oder besser der virtuellen Arbeiten, sei hier nur beiläufig erwähnt. Seine grundsätzliche Bedeutung liegt darin, daß es für jede mögliche, d. h. jede mit den Bedingungen eines beliebig verwickelten Systems zu vereinbarende Bewegung gilt. Diese Eigenschaft besitzen ihrem Ausgangspunkte gemäß auch die Sätze der Energielehre.

Der Umstand, daß die goldene Regel schon der Erschütterungen wegen nicht streng, sondern nur um so genauer bestätigt werden kann, je sorgfältiger diese vermieden werden, und daß sie sich nur bestätigen läßt, wenn die Arbeiten der in jeder Maschine wirksamen Widerstände gehörig in Rechnung gestellt werden, verrät, daß sie ihre Ueberzeugungskraft einem tiefer liegenden Satze verdankt. In der Tat würde jede Abweichung irgendeiner Vorrichtung von der goldenen Regel die Folge haben, daß unbegrenzte Arbeitsfähigkeit erzeugt oder vernichtet werden könnte — man brauchte ja nur den von der goldenen Regel abweichenden Vorgang wiederholt in dem einen oder in dem entgegengesetzten Sinne auszuführen, nachdem er durch Leergang rückgängig gemacht wurde. Der Grundsatz: „In der Natur ist kein Vorgang möglich, dessen Gesamtwirkung Arbeitsleistung oder Arbeitsverbrauch wäre" wird als Perpetuum-mobile-Prinzip bezeichnet, weil seine Ablehnung gleichbedeutend mit der Behauptung wäre, es könnte eine Maschine gebaut werden, die sich trotz der unvermeidlichen Widerstände, ohne daß ihr von außen Arbeit zugeführt würde, also von selbst, in dauerndem Betriebe erhielte.

Das Perpetuum-mobile-Prinzip wäre z. B. erschüttert gewesen, wenn sich nach der Entdeckung der auffälligen Wirkungen, die radioaktive Stoffe auf ihre Umgebung ausüben, nicht der Gegenwert gefunden hätte: diese Stoffe wirken, während sie sich innerlich umwandeln und dadurch ebenso wie eine ablaufende Uhr an weiterer Leistungsfähigkeit verlieren.

Mit den Begriffen Kraft und Arbeit ist aufs Innigste der der Uebertragung verbunden: eine Kraft kann immer nur von einem Körper auf einen anderen ausgeübt werden, der eine leistet, der andere empfängt Arbeit. Die Galilei-Newtonsche Mechanik bringt diese Seite des Kraftbegriffes im Wechselwirkungsprinzip zum Ausdruck, für die energetische Behandlung der Bewegungserscheinungen dagegen ist kennzeichnend, daß sie das in der Kraftwirkung Uebertragene einheitlich erfaßt, nicht dualistisch durch Aktion und Reaktion darstellt.

β) Eigenenergie und erster Hauptsatz. Die bisherige Gedankenentwickelung findet nämlich einen zweckmäßigen Ausdruck, wenn man sich folgender Begriffsbildungen bedient:

1. Eine Vorrichtung, die gegen jede Arbeitsaufnahme und -abgabe gesichert ist, soll ein abgeschlossenes System heißen. Innerhalb eines solchen sind Arbeitsaufnahmen und -abgaben möglich, nämlich zwischen seinen Bestandteilen, die ja selbst wieder Systeme sind, aber im allgemeinen nicht abgeschlossene.

2. Die algebraische Summe aller seit einem willkürlich, aber unveränderlich gewählten Zeitpunkte einem beliebigen System zugeführten Arbeitsbeträge soll Arbeitsfähigkeit oder Eigenenergie dieses Systems heißen.

Die goldene Regel und das Wechselwirkungsprinzip finden mit Hilfe dieser Begriffe ihren einheitlichen Ausdruck in den einfachen Sätzen:

„Die Eigenenergie eines abgeschlossenen Systems ist unveränderlich. Die Zunahme der Eigenenergie eines Systems gleicht der algebraischen Summe der gleichzeitig zugegangenen Arbeit."

Leider haftet dem Begriffe der Eigenenergie der Mangel einer Unbestimmtheit an. Es war willkürlich, von welchem Zeitpunkt an man die einem Körper zugegangenen Arbeitsbeträge algebraisch summiert; ändert man diesen Zeitpunkt, so ändert man im allgemeinen die Zahl, die als Eigenenergie bezeichnet werden soll; es ist also nicht die Eigenenergie selbst definiert, sondern nur ihre Aenderung. Spricht man von der Eigenenergie, die einem Körper in einem gegebenen Zustande zukommt, so benutzt man eine nicht durch die Natur allein gegebene Zahl, vielmehr enthält diese Zahl eine von uns in die Beschreibung der Erscheinungen hineingetragene Willkür, genau wie die Angabe der Höhe eines Erdorts; erst der Unterschied der Eigenenergien eines Körpers in zweien seiner Zustände ist eine willkürfreie, die Natur allein wiedergebende Zahl, genau wie der Höhenunterschied zweier Erdorte.

Nun findet das Perpetuum-mobile-Prinzip seinen zweckmäßigsten Ausdruck in dem als Erster Hauptsatz der Energetik bezeichneten Satze: „Wie verschieden auch bei verschiedenen Uebergängen aus dem einen in den anderen Zustand eines Systems die einzelnen Arbeitsbeträge ausfallen mögen, die dem System zugehen oder entzogen werden, die algebraische Summe aller auf dem einen Uebergang auftretenden Arbeitszugänge ist gleich der auf jedem anderen". Oder kürzer: „Die zwischen zwei Zuständen eines Systems mögliche Energieänderung ist durch diese

Digitized by Google

Zustände allein völlig bestimmt." Oder: „Die Eigenenergie eines Systems in einem gegebenen Zustand ist durch diesen allein völlig bestimmt." Oder: „Die Eigenenergie ist eine Zustandsfunktion". Während z. B. das Schlagwerk einer Uhr Energie an die Umgebung abliefert, ändert sich der innere Zustand der Uhr dergestalt, daß der in ihr aufgespeicherte Energievorrat von Zeit zu Zeit neuer Energiezufuhr durch Aufziehen der Uhr bedarf, um zu neuer Abgabe befähigt zu werden. Die Eigenenergie eines Systems ist dem Kapital eines Unternehmens vergleichbar, das sich durch Ausgaben erschöpfen würde, wenn ihm nicht neue Werte zugingen; in jedem Augenblicke lassen sich die mannigfaltigen Energieformen zu einer Energiebilanz zusammenfassen, wie die Kapitalwerte zu einer Geschäftsbilanz bei jeder Inventur.

Die dem ersten Hauptsatz nicht selten gegebene Form „Die Energie der Welt ist konstant" bringt in überschwänglicher Weise die Meinung zum Ausdruck, daß ein System um so mehr als abgeschlossen betrachtet werden kann, je größer es ist.

Führt man ein System aus einem Anfangszustande durch irgendeine Reihe von Zuständen wieder in den Anfangszustand zurück, so sagt man, daß das System einen Kreisprozeß ausgeführt habe. Daß er keine Energieänderung hinterläßt, wie sehr auch während der einzelnen Teile des Kreisprozesses sich die Energie geändert haben möge, geht aus dem Gesagten genugsam hervor.

γ) Kinetische und potentielle Energie. Solange der Kreisprozeß noch nicht geschlossen, das System noch nicht in seinen anfänglichen Zustand zurückgekehrt ist, spricht sich in der Aenderung der Eigenenergie die Zustandsänderung aus. Der einfachste Fall ist der, daß lediglich zur Aenderung des Geschwindigkeitszustandes Arbeit nötig wird. Für diesen Fall weist die Mechanik nach, daß alle Arbeitsaufnahme als Zunahme der kinetischen Energie, Bewegungsenergie oder Wucht des Systems erscheint, wenn als kinetische Energie einer fortschreitend bewegten Masse das halbe Produkt aus der Masse m und dem Geschwindigkeitsquadrat v^2 verstanden wird: $\frac{1}{2}.m.v^2$. Beispielsweise ist die Eigenenergie eines mit 500 m/sec fliegenden Geschosses von 15 Gramm Masse gleich $\frac{1}{2}.15.5^2.10^8$ Erg.

Aendert sich während eines Vorgangs die kinetische Energie des betrachteten Systems, so läßt sich diese Aenderung in Glieder $d(\frac{1}{2}.m.x'^2) = mx'.dx'$ zerlegen, wobei x' die Geschwindigkeitskomponente nach einer festen Richtung x darstellt. Jeden solchen Elementarzuwachs kann man wieder in Arbeit vom Betrage $mx'.dx' = mx''.dx$ verwandeln und als solche dem System entziehen. Die Forderung, daß keine Aenderung des Systems möglich sein darf, deren Gesamtergebnis Gewinn oder Verlust mechanischer Arbeit wäre, führt dann auf die Differentialgleichungen der Mechanik.

Auch wenn außer für die Geschwindigkeitsänderung noch zur Aenderung der Lage eines Körpers Arbeit erforderlich ist, gelingt es, durch einen Kunstgriff der theoretischen Mechanik, diese Arbeit als Aenderung einer Eigenenergie aufzufassen, sobald nur feststeht, daß gleichviel Arbeit erforderlich ist, auf welchem Wege immer die Lagenänderung vollzogen wird, daß also diese Arbeit nur von Anfangs- und Endlage, nicht vom Ueberführungswege abhängt. In diesem Falle, der übrigens erfahrungsgemäß immer dann eintritt, wenn die in Betracht kommenden Arbeitsleistungen ohne Wärmeänderungen verlaufen, kann man nämlich die Lageänderung als Zustandsänderung des Raumgebietes ansehen, durch das sich der Körper bewegt, und die erforderliche Arbeitsleistung als Aenderung der Eigenenergie dieses Raumgebietes. Um z. B. ein 15 Gramm schweres Geschoß auf irgendeine Weise in eine 10 m höhere Lage zu bringen, bedarf es einer Arbeit von $15.981.10^3$ Erg, und es hindert nichts, zu sagen, daß die Eigenenergie des Raumgebietes, in dem die Hebung vollzogen wurde, um diesen Betrag zugenommen hat. Statt der Bezeichnung Gebiet der Bewegung des Körpers, Gebiet der auf ihn wirkenden Kräfte, hat sich in wenig glücklicher Uebersetzung des englischen Namens die Bezeichnung Feld der Kraftwirkung eingebürgert. So nennt man dann jene Zustandsfunktion des Raumgebietes die Eigenenergie des Feldes oder die potentielle Energie des Körpers, auch die Eigenenergie seiner Lage.

Mathematisch wird die potentielle Energie durch eine Funktion der Lage, der Koordinaten allein, dargestellt, deren vollständiges Differential die während der Lagenänderung eingetretene gesamte Arbeitsabgabe des Körpers oder Arbeitszunahme des Feldes darstellt.

Die Summe der kinetischen und der potentiellen Energie des Körpers läßt sich nun als Eigenenergie eines aus Feld und Körper bestehenden geschlossenen Systems ansehen und ändert sich als solche überhaupt nicht. Beispielsweise kann man, anstatt sich die Eigenenergie eines in 10 m Höhe mit 500 m/sec dahinfliegenden Geschosses von 15 g Masse durch die Arbeitsleistungen der Schwerkraft beim Heben und Senken verändert zu denken, auch das Geschoß mit seinem Felde, nämlich dem Felde der irdischen Schwerkraft, zu einem geschlossenen System vereinigt vorstellen, das $\frac{1}{2}.15.15^2.10^8 + 15.981.10^3$ Erg Gesamtenergie unveränderlich besitzt, so daß während der Bewegung nur die kinetische auf Kosten der potentiellen

Digitized by Google

Energie sich ändern kann und umgekehrt oder die Eigenenergie des Geschosses auf Kosten der des Feldes und umgekehrt. Die Bildung eines solchen geschlossenen Systems ist aber unzulässig, wenn die vom Luftwiderstande herrührenden Energieänderungen in Betracht gezogen werden müssen; denn diese fallen auf verschiedenen Wegen trotz gleicher Höhenänderung sehr verschieden aus und sind auch mit Wärmeänderungen verknüpft.

Der Satz der Mechanik von der Erhaltung der mechanischen Energie, nämlich der Satz, daß, so lange nur rein mechanische Aenderungen in Betracht kommen, die Summe aus kinetischer und potentieller Energie unverändert bleibt, ist hiernach nur eine Einzelfolgerung aus den Grundlagen der Energetik und darf nicht, wie es häufig geschieht, als ihr Ausgangspunkt angesehen werden.

Ueber die physikaliche Natur der zunächst nur als Rechnungsgröße auftretenden Lagenenergie haben sich zwei Vorstellungsweisen ausgebildet, die der Fern- und die der Nahewirkungen. Soweit es sich um Arbeitsleistungen der allgemeinen Gravitation, insbesondere der irdischen Schwere, handelt, hat sich bisher nur die erstere allgemein durchführbar erwiesen, während die Idee der Nahewirkungen, derzufolge die potentielle Energie auf Spannungen von der Art der elastischen Spannungen beruht, sich in allen anderen Fällen, vorzüglich bei Behandlung der durch elektrische und magnetische Kräfte geleisteten Arbeiten, so bewährt hat, daß man geradezu die potentielle Energie vielfach als Spannungsenergie bezeichnet.

1b) Wärmeenergie. Wärmeäquivalent. Robert Mayers Ansatz. Die Entwickelung der Energetik begann erst mit der Frage, ob die bei Bewegungsänderungen, z. B. bei der Reibung, auftretenden Wärmeänderungen in einer quantitativ bestimmten Beziehung zu ersteren stehen. Erst diese Fragestellung hat dazu geführt, die in der vorliegenden Darstellung vorangeschickten energetischen Grundbegriffe zu entwickeln, und findet mit Hilfe derselben eine genaue Antwort, nämlich diese: In den Energiegesetzen kann mechanische Arbeit, also auch kinetische und potentielle Energie, durch Wärme ersetzt werden, und zwar sind 427 technische Meterkilogramme gleichwertig mit einer großen (Kilogramm-) Kalorie oder 419.10^5 Erg gleichwertig mit einer kleinen Kalorie (Grammkalorie).

Es empfiehlt sich deshalb, den Ausdruck Arbeit nicht nur für mechanische Arbeit anzuwenden, sondern auch die Wärme nach Erg zu messen und die so gemessene Wärme Arbeit zu nennen; denn dann gelten die Energiesätze wörtlich, auch wenn Wärmeänderungen auftreten. Die Zahl 419.10^5 erscheint dann als das Wertverhältnis zwischen den Einheiten Erg und kleine Kalorie, genau so wie etwa 0,8 das Wertverhältnis der Einheiten Frank und Mark mißt. Wo mechanische Energie als solche verschwindet, und sich in Wärme umwandelt oder umgekehrt, tritt eine kleine Kalorie an Stelle von 419.10^5 Erg, wie beim Geldwechseln Markstücke an Stelle der Frankstücke treten. In der Eigenenergie eines Körpers sind die Zugänge von Wärme und mechanischer Arbeit, durch die sie angesammelt ist, nicht mehr zu unterscheiden, ebenso wie es bei der Bemessung eines Vermögens nicht auf die Art der Zugänge ankommt, sondern auf dessen rechnerischen Gesamtwert.

Um die Zahl 427 technische Kilogrammmeter pro große Kalorie, das mechanische Wärmeäquivalent, festzustellen, bedurfte es einer langen Reihe von Experimentaluntersuchungen.

Zunächst war überhaupt die Tatsache festzustellen, daß während des Einflusses der Reibung oder anderer Widerstände, oder während des Stoßes, also während mechanische Arbeit verschwindet, Wärme entsteht, was ja mit der alten Auffassung, daß die Wärme ein Stoff sei, schwer vereinbar ist. Der erste, der einen dahin zielenden Versuch durchführte, war Graf Rumford, der 1798 als Leiter der Arbeiten im Münchner Zeughaus nachwies, daß man die beim Kanonenbohren entstehende Wärme benutzen könne, um Wasser im Kanonenlauf bis zum Sieden zu bringen (ein stumpfer Bohrer, der auf dem Boden des Kanonenlaufs saß, wurde von Pferden umgedreht). Auch hat Davy 1798 nachgewiesen, daß beim Reiben trockener, vor äußerer Wärmezufuhr geschützter Eisstücke Wärme entsteht, die das Schmelzen des Eises bewirkt. Aber zu einer Feststellung der quantitativen Beziehung zwischen der verschwundenen mechanischen Arbeit und der entwickelten Wärme ist man damals noch nicht vorgedrungen, hauptsächlich wohl, weil das Interesse zunächst nur auf die Bekämpfung der Stofftheorie der Wärme gerichtet war.

Zur Feststellung des Wärmeäquivalentes gelangte zuerst der Heilbronner Arzt Robert Mayer 1842 auf folgendem Wege.

Mayer wußte, wie aus seinen Briefen hervorgeht, aus Experimentaluntersuchungen anderer, daß wenn ein Gas zusammengedrückt wird, es sich erwärmt, und nahm an, daß bei vollkommenen Gasen die so gewonnene Wärme der aufgewendeten Arbeit gleichwertig ist, oder daß nach ihrer Abgabe, d. h. nach Wiederherstellung der usprünglichen Temperatur, das Gas auch die ursprüngliche Eigenenergie enthält: mit anderen Worten, er nahm an, daß eine Gas-

Digitized by Google

menge bei gleicher Temperatur dieselbe Eigenenergie besitzt, gleichgültig, unter welchem Drucke sie steht. Diese Annahme R. Mayers ist später — worauf an dieser Stelle nicht weiter eingegangen werden soll — von Joule experimentell nachgeprüft und bei angenähert vollkommenen Gasen angenähert bestätigt worden (vgl. S. 521).

Wenn nun ein Gramm eines vollkommenen Gases, das den Druck p, das Volum v und die aus der Zustandsgleichung

$$(1) \qquad p.v = R.\Theta$$

folgende absolute Temperatur Θ besitzt, (R bezeichnet eine Konstante des Gases), durch Wärmezuführung in einen anderen Zustand übergeführt wird, bei dem Druck, Volum und Temperatur um dp, dv, $d\Theta$ vermehrt sind, so wird die eingetretene Aenderung seiner Eigenenergie nach jener Annahme durch die Temperaturänderung $d\Theta$ allein bestimmt sein. Erfolgt die Temperaturänderung bei konstantem Volum, so wird $c_v.d\Theta$ die eingetretene Energieänderung sein, wenn unter c_v die spezifische Wärme des Gases bei konstantem Volum verstanden wird. Erfolgt aber dieselbe Temperaturerhöhung bei konstantem Druck, so bedarf es allerdings größerer Wärme $c_p.d\Theta$, wenn c_p die spezifische Wärme bei konstantem Drucke darstellt; für diesen Mehrbetrag ist aber vom Gase mechanische Arbeit geleistet worden. Wächst das Volum vom anfänglichen Betrage v um dv unter dem Drucke p, so ist p.dv die vom Gase abgegebene, —p.dv die von ihm aufgenommene Arbeit, gemessen nach Erg, und wenn das mechanische Wärmeäquivalent mit $\mathfrak{J}$ bezeichnet wird, beträgt letztere —p.dv:$\mathfrak{J}$ Kalorien. Nach dem Energiegesetze ist

$$c_v.d\Theta = c_p.d\Theta - \frac{1}{\mathfrak{J}}.p.dv,$$

denn beide Seiten dieser Gleichung stellen die nach Kalorien gemessene Aenderung der Eigenenergie beim Uebergang aus dem beiden Aenderungswegen gemeinsamen ursprünglichen in den beiden gemeinsamen Endzustand dar. Da bei konstantem Druck p das Volum um

$$dv = \frac{R}{p} d\Theta$$

größer wird, wenn die Temperatur um $d\Theta$ steigt, so folgt

$$c_v d\Theta = c_p.d\Theta - \frac{R}{\mathfrak{J}} d\Theta$$

oder

$$(2) \qquad \mathfrak{J} = \frac{R}{c_p - c_v}.$$

Für atmosphärische Luft ergibt sich nach Gleichung (1) aus den in ihrem Normalzustand gültigen Zahlen

$$R = 760.13{,}596:1{,}293.273 = 29{,}3 \text{ m}:{}^{\circ}\text{C},$$

und wegen

$$c_p = 0{,}2375 \text{ Cal/kg}, \; c_v = 0{,}1684 \text{ Cal/kg}$$

folgt

$$\mathfrak{J} = 424 \text{ Kilogrammeter pro Kalorie},$$

während Mayer 1842 mittels der damals bekannten Zahlenwerte eine erheblich kleinere Zahl fand.

Später ist das Wärmeäquivalent als eine der wichtigsten physikalischen Konstanten sehr häufig und auf sehr verschiedenen Wegen bestimmt worden. In hervorragender Weise hat vor allem Joule Jahrzehnte hindurch seine reichen Mittel für diese Arbeiten verwendet. Bei Umwandlung der gewöhnlich als Wärme im Schließungsbogen erscheinenden Stromenergie in mechanische Arbeit mittels eines Magnetelektromotors fand er im Jahre 1843 jene Konstante gleich 460, die Reibung des Wassers in engen Röhren führte auf 422, die Verdichtung und Verdünnung der Luft auf 436, aber verbesserte Wiederholungen dieser Versuche und neue Versuchsreihen über die Reibung eines Schaufelrades in Wasser, in Walratöl und besonders in Quecksilber, sowie Versuche über die Reibung von Gußeisen auf Gußeisen führten ihn 1850 dazu, den Mittelwert 423,5 als besten Wert des Wärmeäquivalents aufzustellen. Wir übergehen die mannigfachen Versuchsreihen der folgenden Jahrzehnte, unter denen besonders die ausgedehnten, in großem Maßstab ausgeführten Stoßversuche des Elsässers Hirn hervorragen, und wenden uns sogleich zu den auf höchste Präzision Anspruch machenden neueren Messungen. Aus Reibungsversuchen einerseits, wie sie Joule 1878, Rowland 1890, später Miculescu, sowie Reynolds und Moorby durchführten, andererseits aus Versuchen über Umwandlung elektrischer Arbeit in Wärme, wie sie Joule zuletzt 1867, dann Griffith 1893, Schuster und Gannon 1895, Calendar und Barnes 1902, Dieterici 1905 veröffentlichten, folgt nach der Zusammenstellung von Graetz als derzeit bester Wert $418{,}61.10^5$ Erg/cal, wenn das Wasserstoffthermometer und die 15⁰-Kalorie zugrunde gelegt werden. Das bedeutet in technischem Maße 426,62 Kilogrammeter pro Kalorie in Berlin, 426,82 in München.

Zu einem recht beachtenswerten Grade der Vollkommenheit haben sich auch die Vorlesungsversuche zur Bestimmung des Wärmeäquivalents entwickelt. Bei dem Apparate von Puluj wird die Reibung, die ein um eine vertikale Achse gedrehtes kleines Quecksilberkalorimeter durch Bremsen erfährt, dadurch gemessen, daß der bremsende Hohlkörper an einem Hebel sitzt, der durch einen von einem Gewicht gespannten Faden in einer bestimmten Stellung erhalten wird. Slotte und Grimsehl haben auf ähnlichem Wege Apparate konstruiert, während Ayrton

Digitized by Google

und Haycraft elektrische Arbeit in Wärme umsetzen und dabei den durchströmten Manganindraht gleich als Rührer des Wasserkalorimeters ausgebildet haben.

Die erste Ermittelung des Wärmeäquivalents ist übrigens bei Robert Mayer nur ein Baustein seines Gedankenwerkes, allerdings ein sehr wesentlicher; was Robert Mayer im Grunde beschäftigte, war doch der Aufbau des ganzen Ideenkreises, den wir heute als Energetik bezeichnen und dessen Grundzüge wir im Vorangehenden schon kennen gelernt haben. In die Wissenschaft eingebürgert hat sich dieser Ideenkreis freilich nicht durch Robert Mayer, dessen Veröffentlichungen vielmehr lange unbeachtet blieben. Neben Joules experimentellen Arbeiten gebührt vor allem der 1847 erschienenen Jugendarbeit von Hermann von Helmholtz das Verdienst, auf die neue Betrachtungsweise der Naturvorgänge, zu der Helmholtz selbständig gelangt war, hingelenkt zu haben, aber auch ihm war auf diesem Gebiete kein schneller Erfolg beschieden, weil es sich eben bei der Ausbreitung der Energielehre nicht allein um Anerkennung von neuen Tatsachen, sondern vielmehr um Anpassung an eine neue Betrachtungsweise der Natur handelt.

1c) Elektrische Energie. Strahlende Energie. Es wird kaum eine Anwendung der Grundgedanken geben, bei der so einfach klar hervortritt, was die Energielehre eigentlich will, als Robert Mayers Theorie des Elektrophors. Daß durch Heben des Elektrophordeckels, also durch die mechanische Arbeit der Muskelkraft, die zur Ueberwindung der elektrischen Anziehung zwischen Kuchen und Deckel erforderlich ist, die elektrische Arbeit entsteht, deren Erzeugung der Zweck des Apparates ist —, das ist eine der ersten und tiefsten Anwendungen des Mayerschen Gedankenkreises gewesen.

Helmholtz ist es durch energetische Betrachtungen gelungen, die Beziehung aufzuklären, durch welche die bei den Induktionserscheinungen hervortretende Stromerzeugung aus mechanischer Arbeit mit der elektromagnetischen Erzeugung mechanischer Arbeit durch Ströme verknüpft ist. Entwickelt ein galvanisches Element die elektromotorische Kraft $\varDelta$ und sendet die Stromstärke J durch den Widerstand W, so erzeugt es nach dem Jouleschen Gesetze in dem Zeitelement dt die Wärme $J^2.W.dt = J.\varDelta.dt$. Es würde also den in ihm sich abspielenden chemischen Prozessen in der Zeit dt die Zunahme $J.\varDelta.dt$ seiner Eigenenergie verdanken, wenn es diese nicht wieder als Wärme abgeben müßte. Wenn sich nun im Felde des Schließungsbogens ein Magnet bewegt, so muß in der Zeit dt wegen der elektromagnetischen Kräfte mechanische Arbeit entwickelt werden, deren Betrag J.dV ist, wenn mit —J.V das elektromagnetische Potential zwischen Strom und Magnet bezeichnet wird. Da aber die Eigenenergie des aus Strom und Magnet bestehenden Systems ungeändert bleibt, so geschieht alles auf Kosten des Energiezuganges aus dem Element; es muß daher bei Bewegung des Magneten die Stromstärke J geändert werden, und zwar in dem Maße, daß

$$\mathfrak{J}.J.\varDelta.dt = \mathfrak{J}.J^2Wdt + J.dV$$

Aus dieser, die elektromagnetischen Erfahrungen zum Ausdruck bringenden Gleichung folgt sogleich

$$J = \frac{1}{W}\left(\varDelta - \frac{1}{\mathfrak{J}}\cdot\frac{dV}{dt}\right), \qquad (1)$$

das ist das Induktionsgesetz bei magnetischer Induktion.

Wirken zwei Ströme, die durch die Indizes 1 und 2 unterschieden werden mögen, aufeinander, so lauten die Gesetze, nach denen sich infolge der wechselseitigen elektrischen Induktion ihre Stromstärken regeln

$$J_1W_1 = \varDelta_1 - \frac{1}{\mathfrak{J}}\frac{d(J_2V)}{dt},$$
$$J_2W_2 = \varDelta_2 - \frac{1}{\mathfrak{J}}\frac{d(J_1V)}{dt},$$

wobei V den allein von der gegenseitigen Lage der Stromleiter abhängigen Induktionskoeffizienten bedeutet. Multipliziert man die erste dieser Gleichungen mit $\mathfrak{J}J_1dt$, die zweite mit $\mathfrak{J}J_2dt$, addiert und führt $E = J_1J_2V$ ein, so erhält man

$$dE = \mathfrak{J}.\varDelta_1J_1dt + \mathfrak{J}\varDelta_2J_2dt - \mathfrak{J}J_1^2W_1dt - \mathfrak{J}J_2^2W_2dt - J_1J_2dV. \qquad (2)$$

Dem Energiegesetze ist also genügt, wenn $E = -J_1J_2V$ als Eigenenergie des Systems beider Ströme angesehen wird, der aus den chemischen Kräften der galvanischen Elemente im Zeitelemente dt die in den beiden ersten Gliedern dargestellten Energiebeträge zugehen, während die in den beiden folgenden Gliedern dargestellte Joulesche Wärme abgegeben wird, ebenso wie die im letzten Glied angegebene mechanische Arbeit, die infolge der elektrodynamischen Kräfte beide Ströme aufeinander leisten.

Die elektrischen und magnetischen Erscheinungen bieten eines der wichtigsten Beispiele für die Anwendung des Begriffes der potentiellen Energie als der Energie des Feldes; ja, bei der Beschreibung der elektrischen und magnetischen Erscheinungen ist geradezu der Begriff Feld erst entstanden und hat zu der Idee des Maxwellschen Aethers geführt, eines hypothetischen Stoffes, in dessen Spannungen diese potentielle Energie beruht.

Die Ausbreitung der Energie durch den Aether, also die Strahlung, die wir als Wärme und Licht empfinden, erfolgt nach

Digitized by Google

elektromagnetischen Gesetzen, die seit Maxwell und Hertz Gegenstand der theoretischen Forschung sind. Unmittelbar auf elektromagnetischem Wege wird strahlende Energie erzeugt und aufgenommen beim Telegraphieren ohne Draht. Zum Gegenstand energetischer Untersuchungen wurde die Strahlung, indem zunächst der Gesamtbetrag der von einer Energiequelle, vor allem von der Sonne auf eine gegebene Fläche ausgestrahlten Energie ermittelt wurde; dann wurde die Verteilung dieser Energie auf die verschiedenen Wellenlängen, die Verteilung im Spektrum, untersucht und von Lummer das Strahlungsgesetz experimentell festgestellt. Schließlich hat Planck in einer Reihe theoretischer Arbeiten die Emission und Absorption, überhaupt die Energie der Strahlung aufgeklärt, indem er zeigte, nach welchen Gesetzen sie von schwingungsfähigen Gebilden, Resonatoren, wie wir sie uns in den kleinsten Teilen oder Volumelementen der Körper vorhanden denken, hervorgerufen wird und andererseits wieder in solche übergeht.

Er ist dabei zu der Annahme genötigt worden, daß die Energie nicht in beliebig kleine Beträge verteilt ist, sondern einem Resonator, dessen Eigenschwingung die Schwingungszahl ν besitzt, nur in kleinsten Teilbeträgen $h.\nu$ zu- oder entgehen kann, wobei die universelle Konstante $h = 6{,}548.10^{-27}$ erg.sec ist. Man kann diese unter Voraussetzung einer gegebenen Schwingungsform nicht weiter zerlegbare Energiemenge das Energiequantum der betreffenden Schwingungszahl nennen.

Der hierdurch angeregten Annahme, daß man sich die Energie als eine atomistisch konstituierte Substanz denken müsse, bedarf es nicht, um die tatsächlichen Beziehungen zu beschreiben.

Die Ausbreitung der Energie im elektromagnetischen Felde hat wohl auch vorzugsweise die Anregung dazu gegeben, sich die Energie wie einen Stoff zu denken, der den Raum durchwandert, so daß jedem Teile des gesamten Energievorrates der Natur jederzeit ein bestimmter Ort zukommt. So bequem sich diese Vorstellungsweise den Vorgängen der Strömung und Strahlung anpaßt, wie allen Kraftwirkungen, die sich durch Druck fortpflanzen, so wenig angemessen erscheint sie der Fortpflanzung einer Wirkung durch Zug. Die Energie z. B., die von der Welle eines Motors auf die einer Arbeitsmaschine durch einen Riemen übertragen wird, pflanzt sich entgegen der Bewegung des gespannten Riementeiles fort. Auch scheint in diesem Gedanken von der Wanderung und der Lokalisation der Energie ein beachtenswerter Vorzug der Energie-Idee preisgegeben zu werden, nämlich der, daß die Energielehre eine Beschreibung der Erscheinungen ohne die Beengung der gewöhnlichen Substanzvorstellungen ermöglicht: die Energie an sich ist, wie an keine bestimmte Form, auch nicht an bestimmten Ort oder bestimmte Zeit gebunden.

1d) Andere Energieformen. Energiehaushalt der Erde. Ein Anwendungsgebiet der Energetik, das für ihre Entwickelung von entscheidender Bedeutung geworden ist, kann hier nur berührt werden, die Energieentwickelung bei chemischen Vorgängen. Sie wird gemessen, indem man die bei einer chemischen Umsetzung entwickelte Wärme in einem Kalorimeter auffängt, bevor sie sich zerstreut; dabei muß entweder dafür Sorge getragen werden, daß während der Reaktion keine andere Energieform entsteht als Wärme, oder es muß die anderweit entwickelte Energie in Rechnung gestellt werden. Soll die Energie nur in Wärmeform zustandekommen, so muß man die Reaktion in einem geschlossenen Gefäße sich vollziehen lassen, der kalorimetrischen Bombe. Findet dagegen die Reaktion in einem offenen Gefäß, etwa unter dem Atmosphärendruck statt, der p Dynen auf den qcm betragen möge, so muß die mechanische Arbeit der sich entwickelnden Gase in Rechnung gestellt werden, nämlich bei Entwickelung von v ccm Gas die Arbeit p.v Erg.

Aus chemischen Gründen ist es üblich, die Reaktionswärme tunlichst für das Mol anzugeben, d. i. für so viel Gramm der sich bildenden Substanz, als deren Molekulargewicht anzeigt. Beispielsweise bedeutet die thermochemische Gleichung

$$C + 2O = CO_2 + 97600 \text{ cal},$$

daß bei der vollständigen Verbrennung von 12 g amorphen Kohlenstoffs 97 600 Grammkalorien, also für 1 g rund 8 Kilogrammkalorien entstehen.

Die bei konstantem Volum beobachtete Reaktionswärme, die auch Wärmetönung genannt wird, mißt offenbar den Unterschied zwischen den Eigenenergien der Reaktionsprodukte und denen der Ausgangsstoffe, so daß man sich geradezu in obiger Formel unter den chemischen Zeichen die Eigenenergien der bezeichneten Stoffe vorstellen darf. Sie sagt dann aus, daß die Eigenenergie der elementaren Bestandteile um 97 600 cal größer ist als die von 44 g Kohlendioxyd. Ist die Wärmetönung, wie in diesem Beispiel, positiv, so heißt die Reaktion exotherm, weil sie Energie, zumeist in Wärmeform, nach außen abliefert, andernfalls endotherm.

Ganz flüchtig kann hier nur auf die Energiemessungen physiologischer Vor-

Digitized by Google

gänge bei Tieren und Pflanzen hingewiesen werden, nur das sei betont, daß gerade beim Studium der Lebensvorgänge der Wert eines von jeder besonderen Vorstellung über die Natur des Vorganges unabhängigen Begriffes, wie die Energie es ist, auffällig hervortritt (vgl. den Artikel „Energetik der Organismen").

Wie die Energielehre den Blick philosophierend auf das Ganze lenkt, daß er, statt am einzelnen haften zu bleiben, erkenne, wie eins in dem anderen webt und lebt, möge noch durch einen Hinweis auf den Energiehaushalt der irdischen Vorgänge hervorgehoben werden. Daß alle Energie des irdischen Geschehens im wesentlichen von dem kleinen Teile der gesamten Sonnenstrahlung stammt, den die Erde ihrer Stellung im Weltenraume nach abzufangen vermag, ist bereits von den ersten Begründern der Energielehre betont worden, und vor allem erschien ihnen die Einsicht energetisch bedeutsam, daß nicht etwa die jeweilig zugestrahlte Energie sogleich verwendet und wieder fortgestrahlt, sondern auf mannigfache Weise für spätere Verwendung aufgespeichert, in potentielle Energie umgewandelt, der Eigenenergie des Erdganzen einverleibt wird. So entstammt die Energie unserer Wasserfälle und Ströme aufgestapelten Energievorräten, und das Leben und Verwesen der Pflanze, die Arbeit des Muskels, wie die geistige Tätigkeit erscheint uns als ein dauerndes Aufspeichern, Umsetzen, Entladen der Energie. Zeitlich am ausgedehntesten ist die Aufspeicherung leicht umsetzbarer Energie durchgeführt in den Steinkohlenschätzen der Erdrinde, in denen sich die vom Pflanzenleben einstiger geologischer Epochen der Sonne abgewonnene Energie für die Technik unserer Tage erhalten hat. Das Schicksal aller irdischen Energie aber, soweit sie nicht der Eigenenergie des Erdganzen einverleibt ist, ist die Ausstrahlung in den Weltenraum.

2. Der Entropiebegriff. 2a) Isotherme, Adiabate und Entropie der Gase. Die schnelle Entwickelung der Dampfmaschine mit ihren großen wirtschaftlichen und sozialen Umwälzungen mußte das Interesse der Physiker auf die Vorgänge richten, die bei Gasen und Dämpfen mit Umwandlung von Wärme in mechanische Arbeit verknüpft sind. Wie Robert Mayer 1842 durch Nachdenken über diese Verknüpfung zur ersten quantitativen Feststellung des Wärmeäquivalents und damit zur wesentlichen Begründung der Energieanschauungen gelangt ist, so glückte es Sadi Carnot schon 1824, aus derselben Quelle Folgerungen abzuleiten, die in ihrer späteren Entwickelung durch Clausius zum Entropiebegriff führten.

Bedenken wir zunächst, daß nach der Zustandsgleichung (1 b Gleichung (1)) der vollkommenen Gase $p.v = R.\Theta$ alle Zustände inneren Gleichgewichts einer Gasmasse von 1 Gramm, denen gleiche Temperatur zukommt, auch gleiches Produkt p.v zeigen müssen.

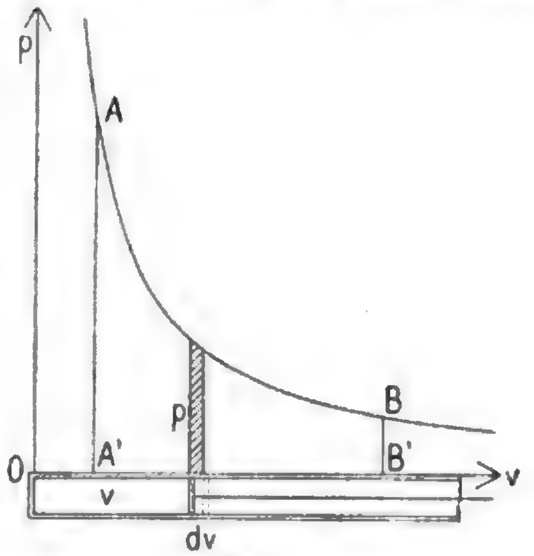


Fig. 1.

Sie lassen sich also im Koordinatensysteme (p, v) graphisch darstellen durch die Punkte einer gleichseitigen Hyperbel, die deshalb als Isotherme des vollkommenen Gases bezeichnet wird. Sie ist nach R. Mayers Annahme (1 b) zugleich die Linie konstanter Eigenenergie des Gases. Schreitet das Gas aus einem Zustande dieser Linie in den benachbarten, so leistet es die mechanische Arbeit p.dv und nimmt ebensoviel Wärme auf; der schraffierte Flächenstreifen in der Figur stellt diesen Betrag dar. Geht also das Gas aus einem durch den Punkt A nach Druck (A'A) und Volum (OA') dargestellten Zustande in einen durch Punkt B dargestellten Zustand gleicher Temperatur und gleicher Eigenenergie über, so gibt die Fläche A'B'BA die bei der angegebenen Aenderung abgegebene mechanische Arbeit und aufgenommene Wärme an.

Ueberlegen wir nun weiter, in welche Zustände ein Gas aus einem gegebenen Anfangszustande übergeführt werden kann, ohne daß ihm Wärme entzogen oder zugeführt wird. Nach dem eben Bemerkten muß sich hierbei die Temperatur ändern. Erhöht sie sich um $d\Theta$, so wächst die Eigenenergie um $c_v.d\Theta$; denn wenn das Volum sich nicht ändert, findet überhaupt kein Zugang mechanischer Arbeit, sondern nur Wärmezugang im angegebenen Betrage statt; ändert sich aber auch das Volum, so ändert sich doch nicht der Energiebetrag, er hängt ja nach dem ersten Hauptsatz nicht von der Art des Uebergangs ab. Nun kann aber, wenn kein Wärmezu- oder -abgang stattfindet, die ganze Zunahme der Eigenenergie nur durch Zugang mecha-

Digitized by Google

nischer Arbeit zustandegekommen sein. Daher folgt

$$c_v . d\Theta = -\frac{1}{3} . p . dv.$$

Nach den Gleichungen 1 b (1) und (2) läßt sich dafür setzen:

$$c_v . d\Theta = -\frac{c_p - c_v}{v} . \Theta . dv$$

oder

$$\frac{d\Theta}{\Theta} = -(\varkappa - 1)\frac{dv}{v},$$

wobei $\varkappa = c_p : c_v$ als Verhältnis der spezifischen Wärmen eingeführt wurde. Die Integration dieser Differentialgleichung führt zu dem Ergebnis, daß

$$\Theta . v^{\varkappa - 1} \text{ konstant,}$$

oder unter Berücksichtigung der Zustandsgleichung $pv = R\Theta$, daß

$$pv^{\varkappa} \text{ konstant}$$

bleiben muß bei allen Gleichgewichtszuständen des Gases, die ohne Wärmezu- oder -abgang ineinander übergeführt werden können. Die Gesamtheit aller solchen Gleichgewichtszustände nennt man eine Adiabate; sie wird graphisch durch eine Kurve

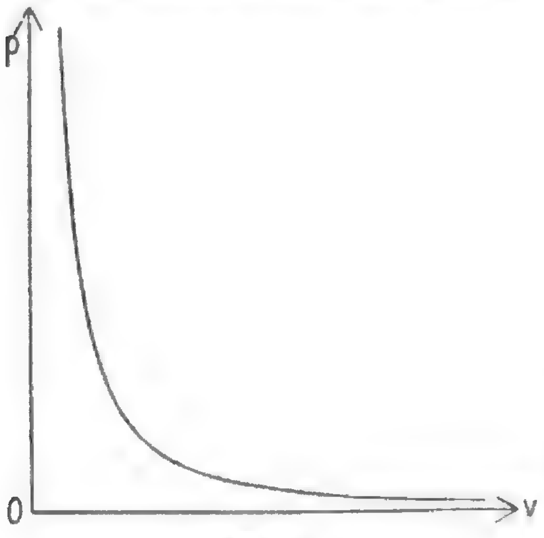


Fig. 2.

dargestellt, die stärker zur v-Achse abfällt, als die Isotherme, auf der das Produkt p.v konstant ist, weil $\varkappa$ größer als 1, bei den meisten Gasen 1,40 bis 1,41 ist.

Denkt man sich durch jeden Punkt, der durch p und v gegeben ist und somit einen Gleichgewichtszustand des Gases vorstellt, die Isotherme gelegt, sowie die Adiabate, so wird die Ebene der bildlichen Darstellung mit 2 Kurvenscharen überzogen. Die auf allen Punkten einer solchen Kurve konstanten Zahlenwerte $pv = R . \Theta$, bezw. $p . v^{\varkappa}$, wachsen von Kurve zu Kurve, wenn man in der Bildebene nach außen fortschreitet.

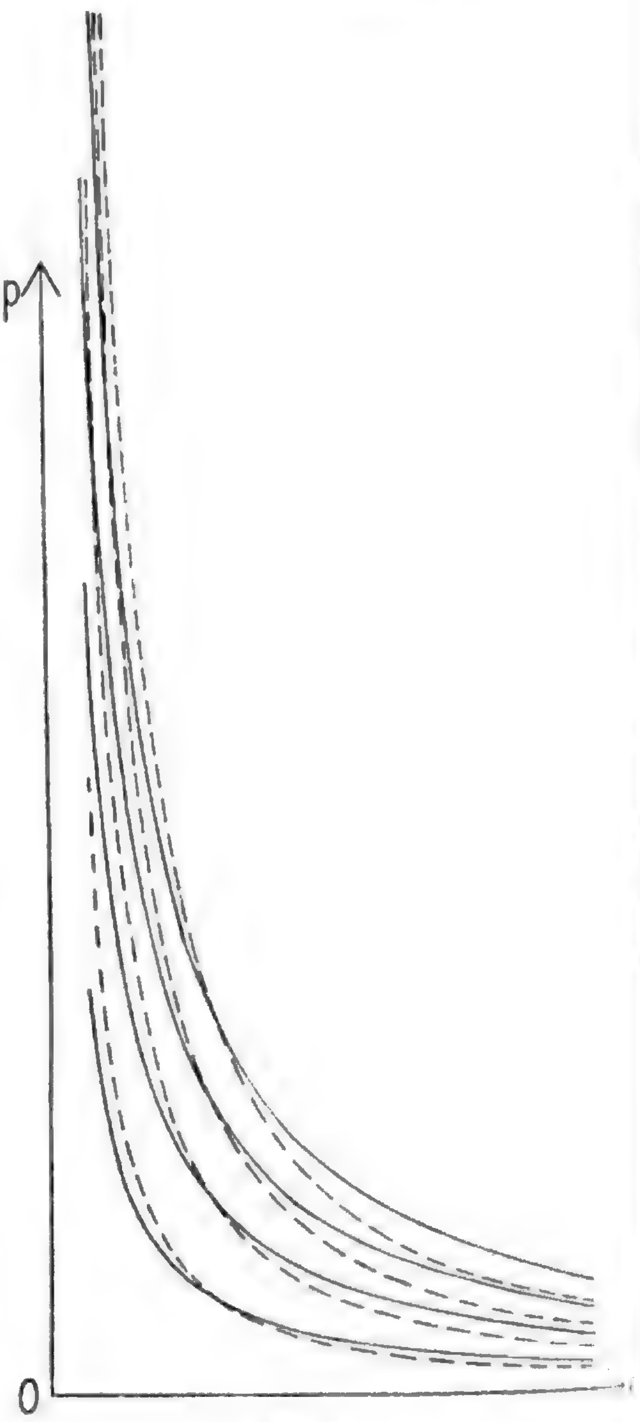


Fig. 3.

Nach diesen Vorbereitungen stellen wir uns mit Sadi Carnot eine Maschine vor, in der 1 Gramm eines vollkommenen Gases teils isotherm, teils adiabatisch aus dem Gleichgewichtszustande p_1, v_1, Θ_1, der (Fig. 4) durch den Punkt P_1 dargestellt sein möge, in den Gleichgewichtszustand p_2, v_2, Θ_2, durch P_2 dargestellt, übergeführt wird. Um dies zu bewerkstelligen, lege man durch P_1 die Isotherme, durch P_2 die Adiabate, die sich in P' schneiden mögen, d. h. auf einen Zustand des Uebergangs aus der isothermen in die adiabatische Aenderung hinführen, für den p', v', Θ' die Bestimmungsstücke sein mögen. Offenbar ist $\Theta' = \Theta_1$, $p_1 v_1 = p'v'$, $p_2 v_2^{\varkappa} = p'v'^{\varkappa}$, daher

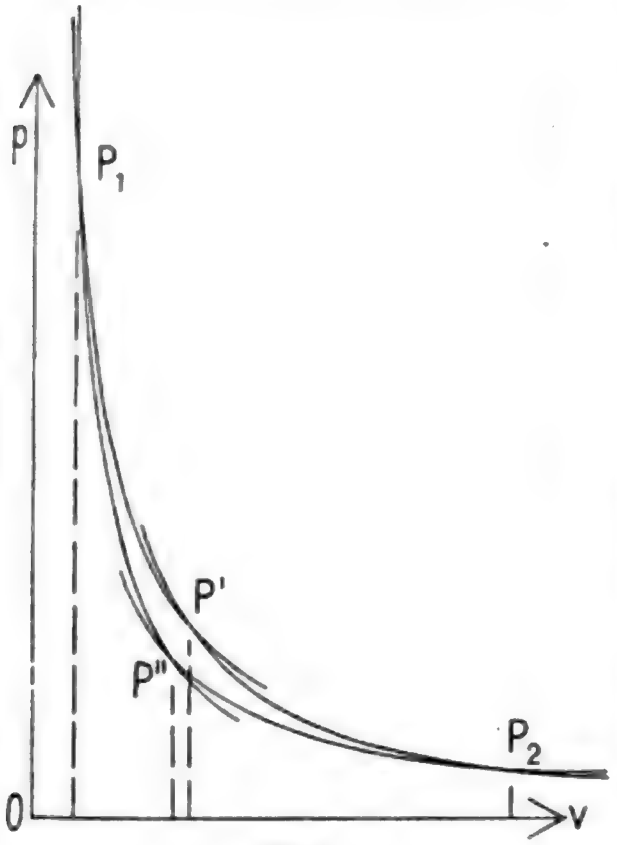


Fig. 4.

$$v'^{\varkappa-1} = \frac{p_2}{p_1}\frac{v_2^{\varkappa}}{v_1},\quad \left(\frac{v'}{v_1}\right)^{\varkappa-1} = \frac{p_2}{p_1}\left(\frac{v_2}{v_1}\right)^{\varkappa}.$$

Die auf dem gesamten Wege $P_1P'P_2$ erforderliche Wärme $Q'_{1,2}$ ist gleich der auf P_1P' allein erforderlichen, wird also durch die unter der Hyperbel P_1P' liegende Fläche gemessen, die zu

$$Q'_{1,2} = \int_{v_1}^{v'} p.dv = R.\Theta_1 \int_{v_1}^{v'} \frac{dv}{v} = R.\Theta_1.\lg\frac{v'}{v_1}$$

$$= \frac{R\Theta_1}{\varkappa-1}\lg\frac{p_2.v_2^{\varkappa}}{p_1.v_1^{\varkappa}}$$

gefunden wird. Bedenkt man, daß $\varkappa = c_p : c_v$ und daß nach der Gleichung 1b (2)

$$R = \mathfrak{Z}(c_p - c_v),$$

so folgt

$$Q'_{1,2} = \mathfrak{Z}.\Theta_1.c_v.\lg\frac{p_2.v_2^{\varkappa}}{p_1.v_1^{\varkappa}}.$$

Nun kann man aber auch vom Zustande P_2 nach P_1 gelangen, indem man zunächst Zustände auf der Isotherme von P_2, dann solche auf der Adiabate von P_1 durchläuft, wobei P'' als Uebergangspunkt erscheint. Die dafür erforderliche Wärmemenge ergibt sich aus der eben angestellten Betrachtung, wenn nur überall 1 mit 2 vertauscht wird. Sie ist also

$$Q''_{2,1} = -\mathfrak{Z}.\Theta_2.c_v \lg\frac{p_2.v_2^{\varkappa}}{p_1.v_1^{\varkappa}},$$

eine negative Zahl, wenn $Q'_{1,2}$ eine positive ist, wie im Falle der Figur. Der Kreisprozeß, der den Zustand P_1 über P' in P_2 überführt und über P'' in den Anfangszustand zurückkehrt, der für die Thermodynamik grundlegende **Carnotsche Kreisprozeß**, bewirkt, daß die zugegangene Wärme $Q'_{1,2}$ teils in Arbeit $Q'_{1,2}-(-Q''_{2,1})$ umgeformt, teils als Wärme $(-Q''_{2,1})$ abgegeben wird.

Durchläuft das Gas die Gleichgewichtszustände von P_1 bis P'', dann von P'' nach P_2, also in umgekehrter Folge, als sie soeben betrachtet wurde, so bedarf es nach dem Energiegesetze, da bei Umkehrung der Folge alle Arbeitsleistungen, wie alle Aenderungen der Wärme und der Energie entgegengesetzt gleiche Werte annehmen, der Wärmezufuhr

$$Q''_{1,2} = +\mathfrak{Z}.\Theta_2 c_v \lg\frac{p_2v_2^{\varkappa}}{p_1v_1^{\varkappa}}.$$

Der Vergleich dieser auf dem Wege $P_1P''P_2$ benötigten Wärmezufuhr mit der oben als $Q'_{1,2}$ berechneten, auf dem Wege $P_1P'P_2$ erforderlichen, zeigt, daß

$$\frac{Q'_{1,2}}{\Theta_1} = \frac{Q''_{1,2}}{\Theta_2},$$

oder daß der Quotient der zugeführten Wärme und der Temperatur der Zuführung auf den beiden von P_1 nach P_2 führenden Wegen denselben Wert besitzt. Für den **Carnotschen Kreisprozeß** aber besteht die Gleichung

$$\frac{Q'_{1,2}}{\Theta_1} + \frac{Q''_{2,1}}{\Theta_2} = 0. \qquad (1)$$

Führt man nun mit **Clausius** eine Funktion ein

$$S = \mathfrak{Z}.c_v.\lg pv^{\varkappa} + C, \qquad (2)$$

die für jeden Gaszustand p, v, Θ insoweit bestimmt ist, daß nur eine Konstante C willkürlich bleibt, so kann man sagen, daß jeder der beiden von irgendeinem Gleichgewichtszustande P_1 nach irgendeinem anderen P_2 führenden aus einer Isotherme und einer Adiabate bestehenden Wege eine Wärmezufuhr $Q_{1,2}$ erfordert, die zwar nicht etwa wie die gesamte Energiezufuhr unabhängig ist vom eingeschlagenen Wege, aber die Eigenschaft hat, daß der Quotient

$$\frac{Q_{1,2}}{\Theta} = S_2 - S_1 \qquad (3)$$

vom Wege unabhängig ist.

In dieser Form verträgt der Satz eine wichtige Erweiterung auf beliebige Uebergangswege. Führt man nämlich das Gas aus P_1 nach P_2 über auf einem ganz beliebigen aus lauter Adiabaten und Isothermen zusammengesetzten Wege, so wird für jede einzelne Isotherme und die darauf folgende Adiabate, also auch für die Summe aller gelten

$$\Sigma\frac{Q}{\Theta} = S_2 - S_1, \qquad (4)$$

Digitized by Google

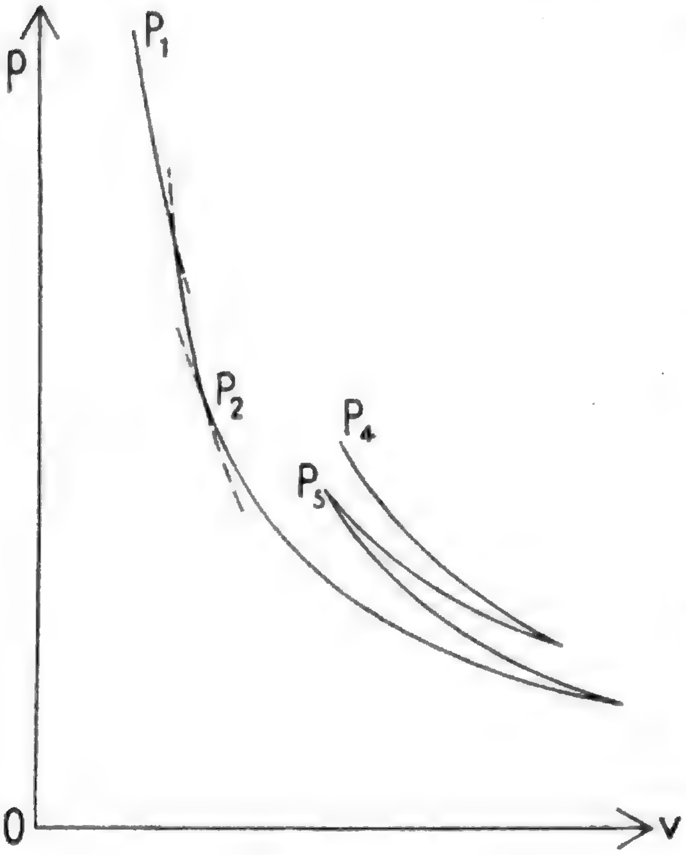


Fig. 5.

wobei alle vom Körper aufgenommenen Wärmemengen positive, alle abgegebenen negative Beiträge zur Summe Σ liefern. Da nun bei hinreichender Verkleinerung der adiabatischen und isothermen Schritte

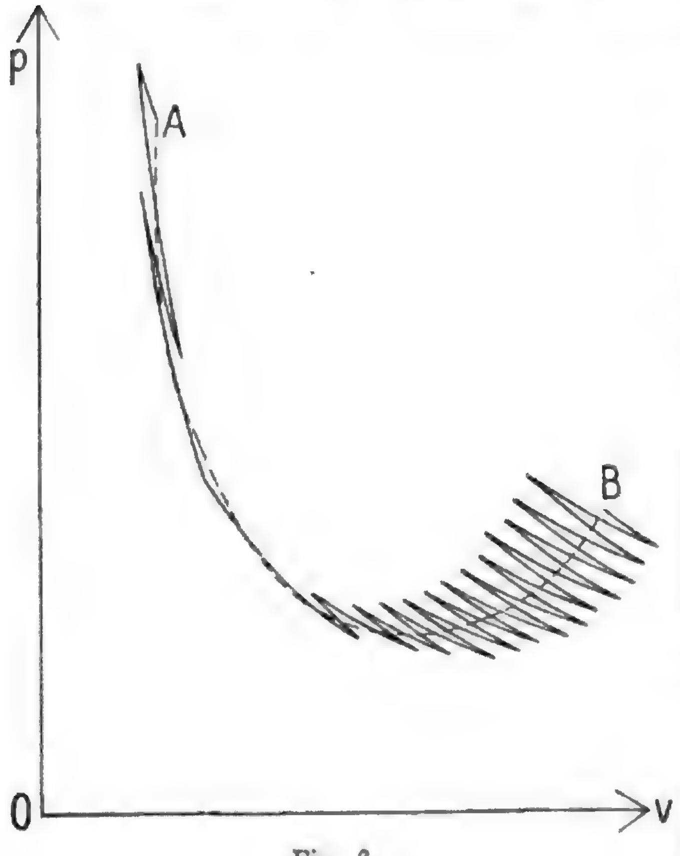


Fig. 6.

schließlich jeder Uebergang wie P_1P_4 in Fig. 5, AB in Fig. 6, als ein aus solchen Schritten bestehender aufgefaßt werden darf, wenn er nur aus einer Folge von lauter Gleichgewichtszuständen besteht, so gilt die Gleichung (4) allgemein: jene durch die zur Aenderung erforderlichen Wärmemengen und ihre Zugangstemperaturen bestimmte Summe ist eine Zustandsfunktion. Die Funktion S ist von Clausius als Entropie bezeichnet worden, und Gleichung (2) stellt die Entropie eines Gramms eines vollkommenen Gases dar.

Die Entropie ist neben der Energie die wichtigste Funktion, zu der die Energetik geführt hat. Ihr Wert ist bei verschiedenen Körpern verschieden, wie der der Eigenenergie; wie die Zunahme der Eigenenergie immer die Summe aller Arbeitszugänge darstellt, so gleicht die Zunahme der Entropie der Summe aller Quotienten aus Wärmezugang und Temperatur des Wärmezugangs, gebildet für eine beliebige Folge von Gleichgewichtszuständen, die durchlaufen werden müssen, um den Anfangs- in den Endzustand überzuführen.

2b) Prinzipe von Carnot, Thomson. Umkehrbarkeit. Um zu zeigen, daß diese im Vorangehenden nur für vollkommene Gase bewiesenen Eigenschaften für beliebige Stoffe gelten, ist eine Erkenntnis nötig, die im wesentlichen von Sadi Carnot den Naturvorgängen gleichsam abgelauscht und in ihrer Tragweite erkannt worden ist, das Carnotsche Prinzip: „In der Natur ist kein Vorgang möglich, dessen Gesamtwirkung Wärmeübergang von niederer zu höherer Temperatur wäre".

In jeder Dampfmaschine wird Wärme von hoher Temperatur dem Kessel entnommen, mittels des Dampfes im Zylinder in mechanische Arbeit verwandelt, und soweit sie nicht dazu verwendet wird, dem Kondensator zugeführt, der durch Kühlwasser auf niederer Temperatur gehalten ist. Den abgekühlten und kondensierten Dampf kann man wieder mit einem geringen Arbeitsaufwand dem Kessel zuführen, so daß der Dampf beliebig oft einen Kreisprozeß durchläuft und immer wieder auf seine ursprüngliche Eigenenergie zurückkommt, während jeder Arbeitsperiode Wärme in mechanische Arbeit umwandelnd und von höherer zu niederer Temperatur überführend. Dieser Kreisprozeß der Dampfmaschine läßt sich, soweit er uns hier interessiert, durch das Schema darstellen:

Wärme von hoher Temp.   Wärme von niederer Temp.

Kessel → Zylinder → Kondensator

↓

mechanische Arbeit

Digitized by Google

Eine Maschine zur Kälteerzeugung oder Kältedampfmaschine kann durch dasselbe Schema versinnlicht werden, nur sind die Pfeile sämtlich umzukehren; ihr Dampf verbraucht mechanische Arbeit, um einem Kühlraum Wärme zu entziehen und diese bei hoher Temperatur abzuliefern.

Nun lehrt schon die Tatsache der Wärmeleitung durch feste Körper, daß der Uebergang der Wärme von hoher zu niederer Temperatur, also im Sinne der Pfeile, in der Natur möglich ist, wenn keine mechanische Arbeit abgegeben wird, wenn nichts weiter geschieht, als Wärmeübergang; der umgekehrte Uebergang kommt aber ohne gleichzeitige Arbeitsleistung in der Natur nicht vor: das ist, was das Carnotsche Prinzip hervorheben will.

Läßt man nun irgendeinen Körper, etwa den Wasserdampf in der Dampfmaschine, einen Kreisprozeß ausführen, während dessen bei hoher Temperatur Θ_1 einer Wärmequelle (Kessel) ein positiver oder negativer Wärmebetrag Q_1 vom Körper aufgenommen, bei niederer Temperatur Θ_2 eines Wasserspeichers (Kondensator) aber Q_2 aufgenommen oder, was dasselbe ist, $-Q_2$ abgegeben wird, so muß nach dem Energiegesetze die mechanische Arbeit

$$A = Q_1 + Q_2$$

abgeliefert werden. Diese möge verwendet werden, um mittels eines vollkommenen Gases durch eine Reihe von lauter Gleichgewichtszuständen die Wärme Q'_2 von der Temperatur Θ_2 in Wärme Q'_1 von der Temperatur Θ_1 überzuführen, so daß

$$A = Q'_1 + Q'_2$$

also

$$Q_1 - Q_1' + Q_2 - Q'_2 = 0.$$

Bei diesem vollkommenen Gase wird dann aber auch nach 2a Gleichung (1) die Beziehung bestehen

$$\frac{Q'_1}{\Theta_1} + \frac{Q'_2}{\Theta_2} = 0. \tag{1}$$

Das Gesamtergebnis beider Prozesse wäre schließlich, daß die Wärmequelle höherer Temperatur die Wärmemenge $Q_1 - Q'_1$ abgegeben und der Wärmespeicher niederer Temperatur Θ_2 die Wärmemenge $Q_2 - Q'_2$ erhalten hätte. Nach Carnots Prinzip darf $Q_1 - Q'_1 = -(Q_2 - Q'_2)$ nicht negativ sein, also

$$Q_1 \geq Q'_1, \quad Q_2 \leq Q'_2.$$

Denn wäre z. B. $Q_2 - Q'_2$ positiv, so hieße das ja, bei der niederen Temperatur sei Wärme aufgenommen und auf höhere überführt worden. Setzt man, unter p eine Zahl verstehend, die positiv oder Null ist,

$$Q_1 = Q'_1 + p, \quad Q_2 = Q'_2 - p,$$

so folgt

$$\frac{Q_1}{\Theta_1} + \frac{Q_2}{\Theta_2} = \frac{Q'_1}{\Theta_1} + \frac{Q'_2}{\Theta_2} + p\left(\frac{1}{\Theta_1} - \frac{1}{\Theta_2}\right)$$

und unter Berücksichtigung der Gleichung (1) und der Voraussetzung, daß $\Theta_1 \geq \Theta_2$, ergibt sich

$$\frac{Q_1}{\Theta_1} + \frac{Q_2}{\Theta_2} \leq 0 \tag{2}$$

für jeden Kreisprozeß, bei dem nur zwei Temperaturen für die Wärmeaufnahme oder -abgabe in Betracht kommen.

Da aber jeder beliebige Prozeß mittels des an Figur 6 besprochenen Verfahrens in solche einfache Prozesse zerlegt werden kann so gilt für jeden Kreisprozeß

$$\Sigma \frac{Q}{\Theta} \leq 0 \tag{3}$$

Den Quotienten $Q:\Theta$ bezeichnete Clausius als Aequivalenzwert der Verwandlung der Wärme Q aus Arbeit.

Wenn ein solcher Kreisprozeß umkehrbar ist, d. h. wenn der arbeitende Körper alle im Kreisprozesse durchlaufenen Zustände auch in umgekehrter Folge durchlaufen kann, z. B. an jeden der benötigten Wärmespeicher, aus dem er im Kreisprozeß Wärme empfing, jetzt ebensoviel Wärme abgibt, so würde wegen der Vorzeichenänderungen für den umgekehrten Verlauf die Beziehung

$$\Sigma \frac{Q}{\Theta} \geq 0$$

gelten, die mit der vorigen nur dann nicht im Widerspruch steht, wenn das Gleichheitszeichen allein gilt.

Daraus schließt man, daß für alle umkehrbaren Kreisprozesse die Gleichung

$$\Sigma_u \frac{Q}{\Theta} = 0 \tag{4}$$

gilt, dagegen für nichtumkehrbare Kreisprozesse nur behauptet werden kann, daß

$$\Sigma_n \frac{Q}{\Theta} < 0 \tag{5}$$

Die oben (2a) betrachteten Kreisprozesse des vollkommenen Gases sind umkehrbare Kreisprozesse, weil sie aus einer Folge von lauter Gleichgewichtszuständen bestehen. Freilich sind diese aus Gleichgewichtszuständen bestehenden Prozesse nur theoretische Grenzvorstellungen: man kann alle wirklich während eines Prozesses in der Natur vorkommenden Aenderungen mehr und mehr verlangsamt denken, die sie bedingende Gleichgewichtsstörung sehr gering sich vorstellen, aber völlig verschwinden kann die Gleichgewichtsstörung nie, ohne daß die Aenderung aufhörte, Aenderung zu sein. Es wird also bei wirklichen Prozessen immer nur angenähert das Gleichheitszeichen in obigen Ansätzen zutreffen, tatsächlich

Digitized by Google

ist immer $\Sigma(Q:\Theta)$ von Null verschieden, in nahe umkehrbaren Vorgängen sehr wenig, aber die Behauptung gilt, daß der Betrag immer nur negativ sein kann.

An Stelle des Carnotschen Prinzips, auf dem die vorangehenden Darlegungen aufgebaut sind, benutzte William Thomson, der spätere Lord Kelvin, 1852 einen Satz, dessen Inhalt man in den Worten wiedergeben kann: „In der Natur ist kein Vorgang möglich, dessen Gesamtwirkung Aufnahme von Wärme aus einer Wärmequelle von unveränderlicher Temperatur und Abgabe der äquivalenten mechanischen Arbeit wäre.“ Dieses Thomsonsche Prinzip ist gleichwertig mit dem Carnotschen. Denn gäbe es einen Vorgang, der entgegen dem Thomsonschen Prinzip nach dem Schema

← Wärme
↓
mechanische Arbeit

Wärme einer unveränderlichen Temperatur lediglich in Arbeit umwandelte, so könnte man die so gewonnene Arbeit benutzen, um die Wärme jener Wärmequelle auf höhere Temperatur zu bringen nach dem Schema

mechanische Arbeit
Wärme höherer ↓ Wärme niederer
Temperatur ←——— Temperatur

Nach Ausführung beider Vorgänge wäre nichts geschehen, als Wärme von niederer auf höhere Temperatur gebracht worden, was nach dem Carnotschen Prinzip in der Natur ausgeschlossen ist.

Ostwald hat eine Vorrichtung, die unbegrenzt Wärme in Arbeit verwandeln könnte, ohne daß sonst etwas geschähe, ohne daß insbesondere die Temperatur geändert würde, ein Perpetuum mobile zweiter Art genannt; Thomsons Prinzip ist demnach als Prinzip von der Unmöglichkeit eines Perpetuum mobile zweiter Art zu bezeichnen. Ein solches wäre z. B. vorhanden, wenn man einen Teil des gewaltigen Wärmegehaltes des Meeres benutzen könnte, um daraus mechanische Arbeit herzustellen, ohne daß irgendeine andere Veränderung einträte. Wie die Unmöglichkeit des gewöhnlichen Perpetuum mobile, des Perpetuum mobile erster Art, zur Begründung des ersten Hauptsatzes der Energetik, des Energiesatzes, dient, so wird durch die Unmöglichkeit des Perpetuum mobile zweiter Art der zweite Hauptsatz der Energetik, der Entropiesatz, begründet.

Die Bedeutung der Perpetuum mobile-Sätze liegt vor allem darin, daß sie die ungeheure Tragweite kennzeichnen, die es haben würde, wenn einer der aus ihnen logisch gefolgerten Sätze durch neue Tatsachen erschüttert würde.

2c) Entropiezunahme. Zweiter Hauptsatz. Gleichgültig, auf welchem umkehrbaren Wege man irgendeinen bestimmten Gleichgewichtszustand 1 eines beliebigen Körpers in einen anderen bestimmten Gleichgewichtszustand 2 überführt, die Summe aller zugegangenen Wärmebeträge, jeder dividiert durch die Absoluttemperatur der Wärmequelle, aus der er stammt, muß sich immer vom gleichen Betrage ergeben:

$$\sum_{u(1,2)} \frac{Q}{\Theta} = S_2 - S_1. \qquad (1)$$

Denn ergäbe sie sich auf einem dieser Uebergänge größer oder kleiner, etwa $S_2 - S_1 + F$, so schließe man diesen Uebergang durch die Umkehrung eines anderen, auf der sie $-(S_2 - S_1)$ ist, zum umkehrbaren Kreisprozeß. Die in Rede stehende Summe würde sich für letzteren zu $(S_2 - S_1 + F) - (S_2 - S_1) = +F$ ergeben, muß aber nach 2b Gleichung (4) Null sein.

Man darf also eine Zustandsfunktion S einführen, deren Aenderung von Zustand zu Zustand unabhängig vom Uebergang ist, nämlich auf jedem umkehrbaren Uebergang im gleichen Betrage $\Sigma(Q:\Theta)$ gefunden wird. Willkürlich bleibt freilich — ganz wie bei der als Energie eingeführten Zustandsfunktion — der Wert von S für einen der Zustände, nur die Aenderung ist definiert. Diese Zustandsfunktion S heißt die Entropie des Körpers.

Neuerdings hat Nernst mit Erfolg die Annahme durchgeführt, daß die Entropie jedes festen oder flüssigen Stoffes im absoluten Nullpunkt der Temperatur Null sei. Durch diese Annahme wird die Willkür in der Wahl der Entropiekonstanten beseitigt.

Führt aber ein nicht umkehrbarer Prozeß den Gleichgewichtszustand 1 in den Gleichgewichtszustand 2 über, so wird die für diesen gebildete Summe $\Sigma(Q:\Theta)$ von $S_2 - S_1$ abweichen können. Ist sie z. B. $S_2 - S_1 + F$, so kann man zwar wieder den Uebergang durch die Umkehrung eines anderen, umkehrbaren, auf der sie $-(S_2 - S_1)$ ist, zum Kreisprozeß schließen, und für diesen ist die Summe $+F$; aber dieser Kreisprozeß ist nicht mehr umkehrbar, weil einer seiner Teile es nicht ist; man kann also nicht behaupten, daß F Null sei, nur positiv kann es nach 2b Gleichung (5) nicht sein. Für beliebige Uebergänge von 1 nach 2 gilt demnach

$$\sum_{(1,2)} \frac{Q}{\Theta} < S_2 - S_1. \qquad (2)$$

Hier ist es zweckmäßig, in der Bezeichnung der Absoluttemperaturen Θ daran zu er-

Digitized by Google

innern, daß diese nichts mit dem arbeitenden, Wärme aufnehmenden und abgebenden Körper zu tun haben, sondern die Temperaturen der Wärmequellen oder Wärmespeicher vorstellen, aus denen er Wärme erhält und an die er Wärme abgibt, ohne daß die Temperatur des Speichers sich ändert. Schreibt man Θ_a für die Temperatur jedes außerhalb des wirkenden Körpers vorhandenen, während des Prozesses vorübergehend mit ihm in Wärmeaustausch tretenden Wärmespeichers, so erscheint obige Formel so:

(2a) $$\sum_{(1,2)} \frac{Q}{\Theta_a} \leq S_2 - S_1$$

Finden innerhalb des betrachteten Systems Wärmeübergänge statt, so denke man sich jeden durch Vermittelung von außerhalb des Systems befindlichen Wärmespeichern ausgeführt, um auch für diesen Fall die vorstehende Betrachtungsweise anzuwenden.

Die Temperaturen Θ des den betrachteten Prozeß ausführenden Körpers werden nun keineswegs mit den Temperaturen der Wärmespeicher von unveränderlicher Temperatur Θ_a übereinstimmen, die er jeweilig berührt; bei Wärmelieferung vom Speicher an den Körper wird vielmehr $\Theta_a > \Theta$, bei Wärmeabgabe vom Körper an den Speicher $\Theta > \Theta_a$. Vor allem aber ist der Fall möglich, daß sich von einer Temperatur des Körpers zeitweilig gar nicht reden läßt, nämlich wenn er sich nicht in einem Zustande des Gleichgewichts befindet. Man kann nur von Temperatur eines Körpers oder Körperteils reden, dessen innere Zustände so wenig schwanken, daß er mit einem temperaturmessenden Instrumente für kurze Zeit in ein hinreichend genau aufrecht erhaltenes Temperaturgleichgewicht treten kann. Nur annähern kann man sich dem Falle, daß während des ganzen Prozesses (1,2) ausschließlich Gleichgewichtszustände durchlaufen werden und infolgedessen die Eigentemperatur des Körpers der der Wärmespeicher gleicht. Nur in diesem Falle, dem umkehrbaren Prozesse, wird Θ_a durch Θ ersetzbar und man erhält die Gleichung

(1a) $$\sum_{(1,2)} \frac{Q}{\Theta} = S_2 - S_1.$$

Erweitert man das betrachtete System, nötigenfalls durch Einbeziehung der für den Vorgang erforderlichen Wärmespeicher in das System, zu einem abgeschlossenen System, das nun keine Wärmezu- und -abgänge mehr erleidet, so wird für jede Aenderung

(3) $$S_2 - S_1 \geq 0$$

sein: die Entropie eines abgeschlossenen Systems kann nie abnehmen.

Verliert z. B. ein Teil eines abgeschlossenen Systems die Wärmemenge Q bei der Temperatur Θ und nimmt sie ein anderer Teil bei der niedrigeren Temperatur Θ' auf, so erleidet das System die Entropieänderung

$$Q\left(-\frac{1}{\Theta} + \frac{1}{\Theta'}\right),$$

die wegen $\Theta > \Theta'$ eine positive Größe ist.

Als ein zweites Beispiel diene der S. 512 erwähnte Joulesche Versuch. Dehnt sich ein Gramm eines vollkommenen Gases vom Volum v aus, indem es in ein Vakuum vom Volum v eindringt, so hat es schließlich das Volum 2v; nach Herstellung des Gleichgewichtszustandes hat es dem Jouleschen Versuche zufolge wieder die ursprüngliche Temperatur, zeigt also nach der Zustandsgleichung einen Druck, der halb so groß ist als der ursprüngliche p. Nach Gleichung 2a (2) ist hier

$$S_2 - S_1 = \mathfrak{J}c_v \lg \frac{1}{2} p.(2v)^{\varkappa} - \mathfrak{J}c_v \lg pv^{\varkappa}$$

und mit Rücksicht auf Gleichung 1b (2) findet man durch eine einfache Umrechnung

$$S_2 - S_1 = R.\lg 2,$$

d. i. einen positiven Wert.

Die in der Ungleichung (3) ausgesprochene Eigenschaft jedes abgeschlossenen Systems hat Clausius entdeckt: „Die Naturvorgänge verlaufen in dem Sinne, daß in jedem abgeschlossenen System die Entropie steigt, wenn sie sich überhaupt ändert. Sie strebt immer höheren Werten zu."

Zu der berühmten Uebertreibung: „Die Entropie der Welt strebt einem Maximum zu" führt die Annahme, daß ein System um so mehr als ein abgeschlossenes zu betrachten ist, je größer es ist.

Hat ein System die Freiheit, in mehrere Gleichgewichtszustände übergehen zu können, so wird es tatsächlich in den übergehen, dessen Entropie am größten ist. Diese Folgerung hat Horstmann 1869 auf die Untersuchung chemischer Vorgänge angewendet, und Planck hat 1879 die Entropie geradezu als Maß der Vorliebe der Natur bezeichnet.

Die in den Abschnitten 2 b und 2 c entwickelten allgemeinen Sätze werden als die Entropiegesetze, auch in ihrer Gesamtheit als Zweiter Hauptsatz der Energetik bezeichnet.

Um zu einer genauen mathematischen Fassung, auf die es bei derartigen Untersuchungen schließlich allein ankommt, zu gelangen, bezeichne man jeden hinreichend kleinen Zugang an mechanischer Arbeit, den ein System erleidet, mit a, einen jeden hinreichend kleinen Wärmezugang mit q. Dann gibt es zufolge des Ersten Hauptsatzes oder Energiesatzes für jedes System eine Zustandsfunktion E, deren Differential dE die Eigenschaft hat

$$dE = q + a. \quad (4)$$

Zufolge des Zweiten Hauptsatzes oder Entropie-

Digitized by Google

gesetzes gibt es ferner eine Zustandsfunktion S, deren Differential die Eigenschaft zukommt

(5) $$q \geqq \Theta_a \, . \, dS,$$

wobei Θ_a die Absoluttemperatur des Wärmespeichers ist, aus dem q stammt, oder an den es abgegeben wird.

Beide Hauptsätze ergeben also die Beziehung

(6) $$dE \leqq \Theta_a \, . \, dS + a,$$

die nur bei umkehrbaren Aenderungen zu der Gleichung wird

(7) $$dE = \Theta . dS + a.$$

Sollte ein System gleichzeitig verschiedene Wärme- oder Arbeitszugänge oder -verluste erfahren, so denke man sich diese zeitlich getrennt und wenn innerhalb des Systems zwischen seinen Teilen Uebertragungen von Wärme und Arbeit stattfinden, denke man sich diese einzeln durch Vermittelung außerhalb des Systems befindlicher Wärmespeicher ausgeführt. Dann gelten vorstehende mathematische Beziehungen für jeden Einzelvorgang und die Gesamtänderung unterliegt denselben Gleichheits- und Ungleichheitsbeziehungen wie ihre sämtlichen Teile.

Am ertragreichsten haben sich die mathematischen Folgerungen erwiesen, die Willard Gibbs aus dem Energie- und dem Entropiegesetz in ihrer Anwendung auf abgeschlossene Systeme gezogen hat. Bei jeder Aenderung eines abgeschlossenen Systems ist

(8) $$dE = 0, \; dS \geqq 0.$$

Kennt man nun Energie E und Entropie S als Funktionen der Bestimmungsstücke, die nötig sind, um jeden beliebigen Gleichgewichtszustand des abgeschlossenen Systems zu kennzeichnen, so kann man auch angeben, bei welchen Aenderungen, die man versuchsweise an den Bestimmungsstücken vornimmt, ohne die Vorschriften zu verletzen, denen diese genügen müssen (virtuelle Aenderungen), das Gleichgewicht erhalten bleibt. Offenbar sind alle Aenderungen, die bewirken, daß gleichzeitig

$$dE = 0 \text{ und } dS < 0$$

oder auch die, mittels Wärmezuführung vorstellbaren, die bewirken, daß gleichzeitig

$$dE > 0 \text{ und } dS = 0$$

wird, nicht zu verwirklichen, die vorstehenden Beziehungen sind also Bedingungen für die Erhaltung des bestehenden Gleichgewichtszustandes. Weil dieser auch bei $dE = 0$, $dS = 0$ erhalten bleibt, lassen sich die Gibbsschen Gleichgewichtsbedingungen des abgeschlossenen Systems so formulieren:

(9) $$dS \leqq 0 \text{ bei } dE = 0$$
$$\text{oder} \quad dE \geqq 0 \text{ bei } dS = 0.$$

In dem besonderen Falle, daß Wärmevorgänge im System ausgeschlossen sind, also $dS = 0$ ist, können die Gibbsschen Bedingungen das alte Prinzip der virtuellen Arbeit ersetzen (vgl. 1 a), dessen Verallgemeinerung sie gewissermaßen darstellen. Gibbs hat von ihnen vorzugsweise zur Untersuchung chemischer Vorgänge Gebrauch gemacht.

Was am Ende vom Energie- und Entropiegesetz geleistet wird, dürfte sich folgendermaßen als Anschauungsweise über das bei den Naturvorgängen Wesentliche aussprechen lassen.

Bei jeder Veränderung, die ein System erleidet, ist auf dreierlei Dinge zu achten: 1. dem System gehen Wärmebeträge aus Wärmespeichern gegebener Temperatur zu, oder werden von ihm an solche abgeliefert. 2. Dem System gehen andere Arbeitsbeträge aus Arbeitsspeichern zu oder werden von ihm an solche abgeliefert. 3. Das System verändert seinen inneren Zustand. Um diesen energetisch zu kennzeichnen, bedarf es zweier Funktionen der diesen Zustand bestimmenden Größen, nämlich der Eigenenergie und der Entropie, die nur für Gleichgewichtszustände des Systems angebbar ist, weil sich nur diese umkehrbar erreichen lassen. Wie ihre Aenderungen mit den unter 1. und 2. bezeichneten Aenderungen im Zusammenhang stehen, das sprechen Energie- und Entropiegesetz aus.

2d) Kollektive Energie. Zerstreuung und Entwertung der Energie. Unordnung. Wahrscheinlichkeit und Entropie. In dem Vorangehenden ist genugsam hervorgehoben worden, wie das Auftreten des Ungleichheitszeichens bei nichtumkehrbaren Prozessen darin begründet ist, daß wir bei diesen Prozessen genötigt sind, wesentliche Bestimmungsstücke derselben, nämlich die Temperaturen, außerhalb des den Prozeß ausführenden Systems zu messen, an den Wärmespeichern, mit denen es in Wärmeaustausch tritt. Nun ist aber bei stürmisch verlaufenden Vorgängen nicht allein die Messung der Temperatur im System selbst ausgeschlossen; wie die Temperatur läßt sich auch der Druck eines Gases im allgemeinen nicht bestimmen, wenn es sich in heftigen inneren Bewegungen befindet; ebenso kann unmittelbar nach dem Stoße eines Körpers durch einen anderen von einer einheitlichen Geschwindigkeit des gestoßenen Körpers nicht die Rede sein.

Derartige Fälle kann man dahin zusammenfassen, daß man sagt, die betreffende Energieform trete als kollektive Energieform auf. Die Einzelbestandteile einer solchen kollektiven Energieform — z. B. die Temperaturen und Drucke einzelner Gebiete in einem stürmisch bewegten Gase oder die Geschwindigkeiten der einzelnen Teile eines soeben gestoßenen Körpers — kann man allenfalls theoretisch, aber nicht praktisch auseinanderhalten und beschränkt sich deshalb darauf, sie durch ihre Mittelwerte, ihre mittleren Abweichungen vom Mittelwerte und andere Angaben der Kollektivmaßlehre zu beschreiben. In allen Fällen kollektiver Energie entziehen sich Teile der dem Körper zugegangenen, aus Quellen oder

Digitized by Google

Speichern mechanischer Arbeit stammenden und dort gemessenen Arbeit der Messung am Körper selbst. Die meßbare durch Dimensionen und andere Messungsergebnisse am Körper darstellbare Eigenenergie ist kleiner als die gesamte, durch Messungen an den Quellen dargestellte Arbeit, weil ein Teil dieser Arbeit an die Umgebung abgeliefert worden ist, bevor der Körper in einen Gleichgewichtszustand kommt oder doch diesem so nahe kommt, daß Messungen an ihm ausgeführt werden können. Nun ist allerdings dieser der Messung am Körper entgangene Teil vorwiegend, aber doch keineswegs ausschließlich als Wärme an die Umgebung übergegangen, das Auftreten des Ungleichheitszeichens ist also nicht an die Energieform der Wärme gebunden, für die es zuerst von Clausius bemerkt worden ist, sondern eine Eigenschaft, zu der jede Energieform führt, wenn sie kollektiv wird. Den Gleichgewichtszustand stören, heißt ja nichts anderes, als die einzelnen Gebiete des Körpers in voneinander abweichende physikalische Zustände versetzen, und nur um so weniger er Gleichgewichtszustände verläßt, schützt der Körper seine Eigenenergie vor kollektivem Zerfall.

Das Bedeutsame dieser Tatsache ist nun, daß der kollektive Zerfall im ganzen nicht rückgängig gemacht werden kann, weil die Entropie nach Formel 2 c (3) nie abnimmt, wenn neue Wärmezufuhr ausgeschlossen ist. So führen denn die Naturvorgänge zur Zerstreuung oder Dissipation der Energie und zu ihrer Entwertung. Mechanische Arbeit kann in Wärme umgewandelt werden, nicht aber kann, — wie das Thomsonsche Prinzip besagt, — diese Wärme vollständig in Arbeit zurückverwandelt werden. Wärme höherer Temperatur kann wohl auf niedrigere übergehen, aber — dem Carnotschen Prinzip gemäß — ist es ausgeschlossen, den umgekehrten Uebergang auszuführen, ohne mechanische Arbeit zu benutzen, die dabei in Wärme umgewandelt wird und dadurch zum Ansteigen des Entropievorrats beiträgt.

Wärme von niedrigerer Temperatur oder größerer Entropie hat also eine geringere Verwendbarkeit auf dem großen Markte der Energie, als der die Natur uns erscheint, weil sie in geringerem Maße verwandelbar ist, als der gleiche Wärmebetrag höherer Temperatur. Ebenso ist Wärme überhaupt im Wirtschaftsleben der Natur wertloser als mechanische Arbeit.

Es bedarf wohl kaum der Bemerkung, daß, wenn hier von „Wert" der Energie die Rede ist, darunter nicht der Arbeitswert, der Energiebetrag, zu verstehen ist — der ändert sich nach dem ersten Hauptsatz nicht —, sondern der Aequivalenzwert (vgl. 2 b) der Verwandlung, das Maß der Verwandlungsfähigkeit. Der Naturverlauf ist in dieser Hinsicht mit dem Umwechseln von großem Gelde in kleines zu vergleichen, mit der durch die natürliche Mannigfaltigkeit unserer Bedürfnisse gebotenen Zersplitterung unseres Einkommens.

Hier stehen wir vor der so oft erörterten weittragenden kosmologischen Folgerung der Energetik: Im Laufe des Naturgeschehens, im Zeitverlaufe geht alle Energie mehr und mehr in Wärmeform über und in Wärme von immer geringerer Temperatur, die Verteilung der Energie auf die verschiedenen Energieformen schreitet immer im Sinne der Entwertung fort. Daß man den zeitlichen Ablauf der Ereignisse wohl im Vorstellungsvermögen umkehren kann, aber nicht in der Wirklichkeit, daß — wie oft gesagt wurde — das Kind nicht in den Mutterleib zurückkehrt, diese durch den Zeitablauf erfaßte Eindeutigkeit im Verlaufe der Naturereignisse, wurzelt im Entropiegesetze.

Da diese Zerstreuung und Entwertung der Energie auf dem Umstande beruht, daß der bei jedem Verlassen eines einheitlichen Gleichgewichtszustandes im System eintretende kollektive Zerfall der Energie im ganzen nicht rückgängig gemacht werden kann, so ergibt sich die Möglichkeit, die Eindeutigkeit des Naturverlaufs durch Betrachtungen über das Wesentliche der kollektiven Unordnung verständlich zu machen. Daß 1000 in wirrer Unordnung durcheinander fliegende Kugeln sämtlich eine ruhende Kugel stoßen, und die Energie vollständig auf diese übertragen, ist gewiß viel unwahrscheinlicher, als der umgekehrte Vorgang, daß eine bewegte Kugel, in einen Haufen von 1000 ruhenden stoßend, diesen ihre Energie abgibt und sie in wirre Unordnung versetzt. Die Herstellung irgendeiner bestimmten Ordnung ist unwahrscheinlicher als ihre Störung, weil die Ordnung einzigartig ist, der Störungen aber viele möglich sind. So erscheint das Bild der Unordnung, das bei der Störung eines Gleichgewichtszustandes ohnedies an die Hand gegeben ist, als erwünschtes Hilfsmittel, das Anwachsen der Entropie verständlich zu machen. Die Entropie eines Systems ist das Maß seiner Unordnung. Unter verschiedenen Zuständen eines Systems hat der wahrscheinlichere die größere Entropie.

Geradezu genötigt zu dieser Auffassung ist die mechanische Weltansicht. Da nämlich rein mechanisch verlaufende Vorgänge stets umkehrbar sind, also ohne Entropieänderung verlaufen, so fehlt es der mechanischen Naturauffassung, die auch in

Digitized by Google

der Wärme nur Bewegungsenergie sieht, aufzunächst an einem Mittel, die Eigenart der Wärmeübergänge, die in der Entropievermehrung hervortritt, zu begreifen. Es hilft auch nicht, der Wärme als mechanischer Energie der Bewegung unwahrnehmbar kleiner Teile andere Eigenschaften beizulegen als der mechanischen Energie gröberer Gebilde; denn geordnete Bewegungen kleiner Teile, wie wir sie in den Energie übertragenden Schwingungen kennen, zeigen keine Entropievermehrung, solange nicht durch Dämpfung Wärmeentwickelung eintritt. Nur jene Wahrscheinlichkeitserwägungen können hier die mechanische Auffassung retten. Sie muß sich die Wärme als Energie ungeordneter Bewegung vorstellen, so daß es zwar theoretisch möglich wäre, einmal eine Vermehrung der Unordnung rückgängig zu machen, aber stets unwahrscheinlicher als weitere Vermehrung der Unordnung.

Für den Fall, daß die Körper atomistisch aus kleinen diskreten Teilen bestehend gedacht werden, hat Boltzmann diese kinetische Hypothese der mechanischen Wärmetheorie am weitesten durchgeführt.

Jeder der hypothetischen Kollektivzustände eines Gases kann nämlich auf sehr verschiedene Weise verwirklicht werden, indem z. B. der Bewegungszustand einer durch die Nummer 1 unterschiedenen Molekel mit derselben Berechtigung auch der mit 2 oder mit 3 bezeichneten zukommen kann usw. Durch die Anzahl der Anordnungen aller Teile, die hiernach einen und denselben Kollektivzustand ergeben, wird dessen Wahrscheinlichkeit bestimmt. Die Entropie eines Zustandes erweist sich proportional dem Logarithmus der Wahrscheinlichkeit dieses Zustandes.

3. Die Gleichartigkeit der Energieformen. 3a) Intensität und Extensität. Wie der Wärme nach dem Carnotschen Prinzip ein Bestreben zukommt, von höherer zu niederer Temperatur überzugehen, so besitzt jede Energieform ein entsprechendes Bestreben als charakteristische Eigenschaft. Das haben wohl zuerst Zeuner 1866 und Mach 1871 bemerkt. Volumenergie z. B. hat das Bestreben, von höherem zu niederem Drucke überzugehen. Diese Aenderung — etwa die Ausdehnung eines vollkommenen Gases — kann nämlich eintreten, ohne daß etwas weiteres geschieht, als Bildung von kollektiver Energie, die sich wegen der Zerstreuung der Energie als Wärme auf die Umgebung ausbreitet und bald der Betrachtung entzieht, von selbst uns entgeht. Soll dagegen umgekehrt ein Gas von niederem Drucke sich ausdehnen, und dabei eine Gasmenge von höherem Drucke zusammengepreßt werden, so ist dazu Aufwand anderweiter Energie nötig, z. B. Aufwand von Wärme, der sich ohne besondere Einrichtungen nicht vollzieht. Nur weil die Zerstreuung der Energie ohne unser Zutun „von selbst" verläuft, besitzen die Energieformen solches einseitige Bestreben.

Heißt p_a der Druck eines Speichers der Volumenergie, z. B. der Atmosphäre, v das Volum eines Arbeitskörpers, so ist die Volumarbeit, die letzterer aus dem Speicher bezieht $-p_a.dv$, so daß er bei positivem dv, also bei Volumvergrößerung, Arbeit an den Speicher abliefert. Dieser Ausdruck steht in vollster Analogie zu $\Theta_a.dS$, nicht nur insofern, als beide Energiebeträge darstellen, sondern auch insofern, als der Faktor des Differentials eine Funktion bezeichnet, die das Bestreben der Energieform, auf die Umgebung überzugehen, mißt. Dieser Faktor soll Intensität der Energieform heißen. Nur von höherer zu niederer Intensität vermag die Energieform von selbst überzugehen, d. h. unter Entwickelung von Wärme, die sich ohne unser Zutun zerstreut. Endlich zeigen auch die Funktionen, deren Differentiale in obigen Darstellungen der Energieformen auftreten, gemeinsame Eigenschaften: das Volum v eines Körpers kann seinen Wert nur um einen Betrag ändern, um den das Volum eines anderen Körpers abnimmt, der Gesamtbetrag aller Volume eines abgeschlossenen Systems ändert sich nicht. Das ist auch bei der Entropie S der Fall, allerdings nur — und hier liegt eine Besonderheit der Wärmeenergie vor — so lange lediglich umkehrbare Prozesse stattfinden, so lange also der Zerstreuungsvorgang nicht eingeleitet ist. Wir nennen jede Zustandsfunktion, die die Eigenschaften hat, daß sich, wenn man ihre gleichzeitigen Aenderungen bei allen Körpern eines abgeschlossenen Systems addiert, eine konstante Summe ergibt, und daß wenn man ihre Aenderungen mit Intensitätswerten multipliziert, Energiebeträge entstehen, Extensität (auch Quantitätsfunktion und Kapazität) der betreffenden Energieform.

Die Erfahrung zeigt nämlich, daß jede Energieform die hier zunächst bei der Wärme und bei der Volumenergie besprochenen Eigenschaften besitzt, so daß sich jeder Arbeitszugang eines Körpers schreiben läßt

$$a = I_a\ .dM,$$

wobei durch I die Intensität der Energiequelle, durch M die Extensität des Arbeitskörpers bezeichnet wird. Die wesentlichen Eigenschaften daß die Werte von I die Richtung bestimmen, in der sich Energieübergänge von selbst vollziehen, und daß die über alle dM eines abgeschlossenen Systems gebildete Summe $\Sigma dM = 0$ ist, außer

Digitized by Google

bei der Entropie, wo sie positiv sein kann, diese Eigenschaften bedingen sich gegenseitig, wie Gibbs bewiesen hat.

Aus der folgenden Zusammenstellung dürfte ohne weitere Erläuterung die allgemeine Gültigkeit dieser Beziehungen hervortreten.

Energieform	Intensität	Extensität
Wärme	absolute Temperatur	Entropie
Volumenergie	Druck	negatives Volum
Oberflächenenergie	Oberflächenspannung	Oberflächengröße
Wechselwirkung	Kraft	Abstand
potentielle Energie	Potentialfunktion	Masse
chemische Energie	Gibbssches Potential	Masse
kinetische Energie	Geschwindigkeit	Bewegungsgröße
elektrische Strömungsenergie	elektromotorische Kraft	Elektrizitätsmenge.

3b) Freie Energie. Die beiden Hauptsätze werden zugleich mit den Intensitäts- und Extensitätseigenschaften in der Formel zum Ausdruck gebracht

(1) $$dE \leq \Theta_a \,.\, dS + \Sigma\, I_a \,.\, dM$$

in der das Summenzeichen soviel Glieder umspannt als Energieformen außer der Wärme zu unterscheiden sind. Im Falle umkehrbarer Aenderungen geht die Formel über in

(2) $$dE = \Theta . dS + \Sigma I . dM$$

Diese läßt eine wichtige Umformung zu:

(3) $$d(E - \Theta . S) = -S . d\Theta + \Sigma I . dM,$$

die es angezeigt erscheinen läßt, bei isothermen Aenderungen eine Funktion

(4) $$F = E - \Theta S$$

einzuführen, um als Ergebnis

(5) $$dF = \Sigma I . dM$$

zu erhalten.

Bei isothermen Aenderungen führt auch Formel (1) auf

(6) $$d(E - \Theta_a \,.\, S) \leq \Sigma\, I_a \,.\, dM$$

und, wenn diese zugleich umkehrbar sind, ergibt sich wieder Gleichung 3.

Die Funktion F wird als freie Energie bezeichnet, weil sie für alle Energieformen außer der Wärme, insbesondere für mechanische Energie verfügbar, also noch mit Verwandlungsfreiheit versehen ist, während $\Theta . S$ als an die Wärmeform gebundene Energie betrachtet werden muß. Beispielsweise wird die Volumarbeit, die einem Gase zugeht, während es seine Temperatur unverändert erhält, nicht der gesamten Energieänderung des Gases gleichen, die ja Null ist, sondern der seiner freien Energie; dabei sinkt die im Gase an die Wärmeform gebundene Energie, es muß nämlich Wärme dem Gase entzogen werden, damit nicht Temperaturerhöhung eintritt.

Allerdings lassen sich dieser freien Energie gleichberechtigte Begriffsbildungen an die Seite stellen. So empfiehlt es sich, für die ohne Druckänderung, z. B. unter Atmosphärendruck, verlaufenden Vorgänge die Funktion

$$G = E + p_a . v \tag{7}$$

einzuführen und die Energiegleichung $dE = q - p_a . dv$ in die Form zu bringen $G = q$. Die Funktion G stellt dann die dem Arbeitskörper als Wärme zugegangene Energie dar, und wird Reaktionswärme bei konstantem Druck (vgl. 1 d) auch Wärmeinhalt genannt. Gibbs hat solche Funktionen von der Form $E - IM$ in ausgedehnterem Maße verwendet, und wegen der in Gleichung (5) gegebenen mathematischen Darstellung ihres vollständigen Differentials hat man sie thermodynamische Potentiale genannt: $F = E - \Theta S$ wäre also thermodynamisches Potential bei konstanter Temperatur, $G = E + pv$ bei konstantem Druck, auch $E - \Theta S + pv$ thermodynamisches Potential bei konstanter Temperatur und konstantem Druck.

Um die Art ihrer Verwendung und überhaupt die Eigenart energetischer Behandlungsweisen zu zeigen, mögen noch folgende Untersuchungen dienen.

Umkehrbare isotherme Vorgänge sind die Aggregatsänderungen. Innerhalb einer großen, gleichmäßig auf der Temperatur Θ befindlichen Menge eines homogenen Stoffes möge 1 Gramm desselben seinen Aggregatzustand ändern. Dabei ändert sich sein thermodynamisches Potential bei konstanter Temperatur oder seine freie Energie F gemäß der Gleichung

$$d(E - \Theta S) = -S d\Theta - p dv,$$

wenn die gesamte Masse unter dem Drucke p steht, und mit v das Volum, mit S die Entropie, mit E die Energie des Gramms bezeichnet wird, das sich umwandelt. Faßt man die freie Energie als Funktion von v und Θ auf, so gibt vorstehende Gleichung das vollständige Differential an und kann daher aus mathematischen Gründen nur bestehen, wenn

$$\frac{\partial S}{\partial v} = \frac{\partial p}{\partial \Theta}. \tag{8}$$

Da aber auch S als Funktion von v und Θ die Gleichung

Digitized by Google

$$dS = \frac{\partial S}{\partial v} dv + \frac{\partial S}{\partial \Theta} d\Theta$$

liefert, so stellt bei isothermen umkehrbaren Aenderungen

$$q = \Theta dS = \Theta \frac{\partial S}{\partial v} dv$$

die zugegangene Wärme dar, und Gleichung (8) führt auf

$$(9) \qquad q = \Theta \frac{\partial p}{\partial \Theta} dv.$$

Das also ist die Wärme, die nötig ist, um einem Gramm bei der Temperatur Θ umkehrbar die Volumzunahme dv aufzuerlegen: auf unseren Fall angewendet, erscheint als Schmelz- sowie als Verdampfungswärme Q, wenn Δv die dabei nötige Volumänderung eines Gramms bezeichnet, der Betrag

$$(10) \qquad Q = \Theta . \frac{\partial p}{\partial \Theta} . \Delta v.$$

Diese wichtige Gleichung ist von Clapeyron schon 1834 gefunden worden. Sie zeigt z. B., daß, weil Wasser beim Schmelzen Wärme Q aufnimmt, aber sein spezifisches Volum v vermindert, die Temperatur Θ des Schmelzens mit wachsendem Druck p sinken, nämlich $\partial p : \partial \Theta$ negativ sein muß, und setzt überhaupt das Gesetz der Abhängigkeit zwischen Druck und Temperatur der Aggregatsänderung in Beziehung zu der Volumänderung Δv und der Aggregatswärme Q.

Wichtiger aber ist, daß die Clapeyronsche Gleichung ihrer energetischen Begründung gemäß eine sehr allgemeine Gültigkeit, auch für äußerlich ganz anders erscheinende Vorgänge hat. Wie für jede Aggregatsänderung gilt sie z. B. auch für jeden Uebergang in eine „allotrope“ Modifikation, für Dissoziationen und für chemische Aenderungen überhaupt, wenn sie nur isotherm und umkehrbar erfolgen. Aber noch mehr: es kann auch an Stelle der Volumenergie eine andere treten, ohne daß die vorgetragene Schlußweise hinfällig wird. Setzen wir statt der Volumenergie die Energie der elektrischen Strömung, so gelangen wir z. B. zu einem durch die Erfahrung bestätigten Satze über die Vorgänge in der galvanischen Zelle.

Während durch ein galvanisches Element von der elektromotorischen Kraft Δ eine Elektrizitätsmenge von ε Coulomb hindurchgeht, ändert es seine Eigenenergie, da der Vorgang umkehrbar verläuft, um den Betrag:

$$dE = \Theta dS - \Delta . d\varepsilon$$

(vgl. 1 c, wo nur $d\varepsilon$ durch das gleichbedeutende J.dt ersetzt ist). Wir formen wie oben um:

$$d(E - \Theta . S) = -S d\Theta - \Delta . d\varepsilon$$

und dürfen nun Δ und ε an Stelle von p und v treten lassen. Es ergibt sich also

$$q = \Theta . \frac{\partial \Delta}{\partial \Theta} . d\varepsilon \qquad (11)$$

als die Wärme, die bei isothermer umkehrbarer Arbeit der galvanischen Zelle während der Entladung von $d\varepsilon$ Coulomb zugeführt werden muß. Während der Entladung von 1 Coulomb bedarf es also der Wärmezufuhr

$$Q^{(1)} = \Theta . \frac{\partial \Delta}{\partial \Theta} \qquad (12)$$

um das galvanische Element vor Temperaturänderung zu bewahren. So gibt z. B. das Clark-Element, dessen elektromotorische Kraft

$$\Delta = 1{,}4328 - 0{,}00119 (\vartheta - 15)$$

gesetzt werden darf, so lange die Temperatur ϑ nahe bei 15° C liegt, bei dieser Temperatur 24 % seiner elektromotorischen Kraft in Wärmeform an die Umgebung ab, wenn es isotherm arbeitet, denn

$$\frac{Q}{\Delta} = \frac{\Theta}{\Delta} . \frac{\partial \Delta}{\partial \Theta} = \frac{288}{1{,}4328} (-0{,}00119) = -0{,}239.$$

Der chemische Prozeß im Element liefert also 124 % der elektrisch verwerteten Energie.

3c) Abschluß. Daß die Energetik solche Untersuchungen durchzuführen vermag, ohne besondere Annahmen über die innere Struktur der Vorgänge zu machen, die untersucht werden, ja, ohne sich auf Vorgänge einer bestimmten Art zu beschränken, ist besonders charakteristisch für die energetische Methode. Selbstverständlich bedarf sie der Nachprüfung durch die Erfahrung, um sicher zu sein, daß sie die zur Beschreibung eines Vorgangs in Betracht gezogenen Energieformen hinreichend vollständig ausgewählt und die Bedingungen, denen ihre Intensitäten und Extensitäten unterworfen sind, hinreichend genau eingeführt hat. Daß jedes ihrer für eine Energieform gültigen Ergebnisse auch auf jede andere übertragbar ist, oder besser, daß man die Natur in einer Weise betrachten kann, die äußerlich höchst verschiedene Vorgänge als gleichartig erscheinen läßt, gibt der Energetik einen Zug der Synthese, den in solcher Allgemeinheit keine andere Betrachtungsweise besitzt. Die analysierende Atomistik ist in diesem Sinne ihr methodischer Gegensatz Indessen ist nicht etwa in sachlicher Beziehung ein Gegensatz vorhanden, vielmehr hat auch die Atomistik ebenso wie jede andere analysierende Methode ihre Gebilde so zu konstruieren, daß den Gesetzen der Energie und Entropie genügt wird.

In einem anderen Sinne steht allerdings

Digitized by Google

die Energetik seit ihren ersten Spuren polar dem Atomismus, aber nicht nur diesem gegenüber; sie ist im Gegensatz gegen jede Ansicht, die eine Erklärung der Naturvorgänge darin sucht, daß sie alle auf Bewegung, oder etwa alle auf Elektrizität zurückführt, die in allen quantitativen Beziehungen qualitative Gleichartigkeit sucht. Nicht etwa, daß nicht auch die Energielehre Einheitlichkeit anstrebe; aber für sie ist die Einheitlichkeit vorhanden, ohne stoffliche Gleichartigkeit, die Formen wechseln, ihr quantitativer Inhalt bleibt.

Literatur. *Die geschichtliche Entwickelung und zusammenfassende Darstellung der Energetik geben:* **G. Helm**, *Die Lehre von der Energie. Leipzig 1887.* — **Derselbe**, *Die Energetik nach ihrer geschichtlichen Entwickelung. Leipzig 1898.* — **M. Planck**, *Das Prinzip der Erhaltung der Energie. Leipzig 1887. 2. Aufl. 1908.* — **E. Mach**, *Die Geschichte und die Wurzel des Satzes von der Erhaltung der Arbeit. Prag 1872. Zweiter Abdruck Leipzig 1909.* — **W. Ostwald**, *Lehrbuch der allgem. Chemie. 2. Aufl. 1891 u. f.* — **Derselbe**, *Die Energie. Leipzig 1908.*

Die Originalarbeiten der Begründer der Energetik sind am leichtesten zugänglich durch die Abdrücke in Ostwalds Klassiker der exakten Wissenschaften: Nr. 37 **S. Carnot**, *99* **Clausius**, *1 und 124* **Helmholtz**, *101* **Kirchhoff**, *137* **Horstmann**, *180* **R. Mayer**. — *Ferner:* **W. Thomson**, *Math. and physical papers. Cambridge 1882.* — **J. W. Gibbs**, *Thermodynamische Studien. Uebersetzt von Ostwald. Leipzig 1892.*

Systematische Darstellungen einzelner Gebiete: **M. Planck**, *Vorlesungen über Thermodynamik. 3. Aufl. Leipzig 1911.* — **Derselbe**, *Vorlesungen über die Theorie der Wärmestrahlung. Leipzig 1906.* — **G. Zeuner**, *Technische Thermodynamik. Leipzig 1905.* — **C. Neumann**, *Vorlesungen über die mechanische Theorie der Wärme. Leipzig 1875.* — **G. Helm**, *Grundzüge der mathematischen Chemie. Leipzig 1894.* — **W. Nernst**, *Theoretische Chemie. 6. Aufl. Stuttgart 1909.*

Ein allgemeines System der Energetik entwickelt **P. Duhem**, *Traité d'énergétique ou de thermodynamique générale. Paris 1911. — Die Darstellung der gesamten Physik wird auf die Energielehre gegründet bei* **H. Ebert**, *Lehrbuch der Physik. Band 1. Leipzig 1912. — Unter den für die Schule bestimmten Physikbüchern ist* **L. Dressel**, *Elementares Lehrbuch der Physik. Freiburg i. Br. 1905, grundsätzlich auf die Energielehre gestellt, doch führen selbstverständlich die neueren Lehrbücher sämtlich in sie ein. — Ueber alle Einzelheiten vgl.* **Winkelmann**, *Handbuch der Physik. 6 Bände. Leipzig 1905 bis 1909.*

G. Helm.

Enhydros

mit wässeriger Flüssigkeit erfüllte Achatmandeln (vgl. den Artikel „Schmucksteine").

Enteropneusta.

1. Uebersicht der Organisation. 2. Besondere Ausbildung einzelner Teile: a) Kiemen. b) Darmkanal; Leberregion; Darmpforten; Nebendarm. c) Grenzmembran und Skelett. d) Mesenterien. e) Muskulatur; Lateralsepten; Perihämal- und Peripharyngealräume. f) Pforten. g) Nervensystem und Sinnesorgane. h) Blutgefäßsystem; Glomeruli. i) Exkretionsorgane. k) Geschlechtsorgane. 3. Ontogenie. 4. Biologie. 5. Systematik und Phylogenie.

1. Uebersicht der Organisation. Die Enteropneusten sind im Meeresboden grabende Tiere von wurmähnlicher Körpergestalt, von wenigen Zentimetern bis zu 1 m Länge und darüber (Balanoglossus gigas 2,5 m). Nachdem durch Eschscholtz 1827 eine Form aus dem Stillen Ozean als Ptychodera flava namhaft gemacht und 1829 durch Delle Chiaje von der Küste Italiens eine andere als Balanoglossus clavigerus beschrieben war, wurde die Aufmerksamkeit 1866 durch A. Kowalevski auf diese Tiere gelenkt, der außer der letzterwähnten eine kleine Art im Golf von Neapel (Balanoglossus minutus) aufgefunden und beide zum ersten Male etwas eingehender untersucht hatte. Daraus ergab sich, daß die Balanoglossen insofern eine sehr eigenartige und von allen übrigen „Würmern" weit entfernte Organisation besitzen, als ihr vorderer Darmabschnitt mit Kiemen ausgestattet ist, was 1870 Gegenbaur veranlaßte, sie als Enteropneusti zu bezeichnen.

Für das Aeußere (Fig. 1) ist neben einer in der Gestalt sich deutlich aussprechenden bilateralen Symmetrie besonders die Ausbildung von 3 aufeinanderfolgenden Körperabschnitten charakteristisch, nämlich 1. einem etwa einer Eichelfrucht ähnlichen Kopfteil (Rüssel, Eichel), 2. einem kurzen, annähernd zylindrischen Kragen und 3. einem langen Rumpf, der seinerseits mehrere Abschnitte von wechselnder Länge unterscheiden läßt. Der erste birgt in sich die Kiemen, deren spaltförmige Oeffnungen an seiner dorsalen Seite in paariger Anordnung zutage treten (Kiemenregion). Darauf folgt ein Abschnitt, an dessen dorsaler Seite zahlreiche Paare von Geschlechtsdrüsen ausmünden (Genitalregion), die sich aber mehr oder weniger weit auch in die vorhergehende hinein erstrecken. Der hieran sich anschließende Ab-

Digitized by Google

schnitt ist bei vielen Enteropneusten äußerlich durch paarige hervortretende Leberblindsäcke als Leberregion gekennzeichnet. Endlich folgt ein aller dieser Organe entbehrender Hinterkörper. Kiemen- und Genitalregion können auch als Thorax zusammengefaßt werden.

Am vorderen Ende des Kragens befindet sich als eine weite, nicht verschließbare Oeffnung der Mund, überlagert von der Eichel, die durch einen stielartig engen kurzen „Hals" von dessen dorsaler Seite ausgeht. Die Basis der Eichel wird von einer trichterförmigen Verlängerung des Kragens immer eine Strecke weit mit umfaßt. Am Ende des Hinterleibes liegt der After. Der den Körper vom Munde zum After durchziehende Darmkanal ist ein gerades, nicht oder kaum geschlängeltes Rohr von, soweit nicht besondere Teile eine Gestaltveränderung bedingen, annähernd zylindrischer Form.

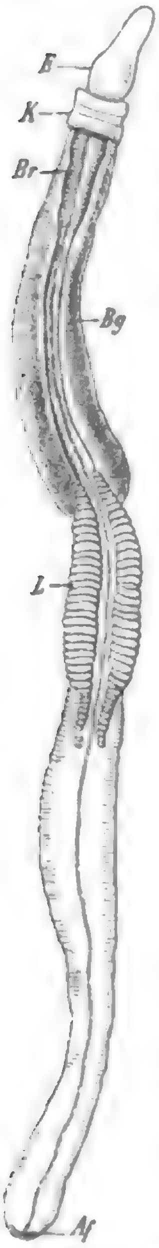


Fig. 1. Glossobalanus minutus (Kow.). Aus Claus-Grobben. Af After; Bg Genitalregion; Br Kiemenfeld; E Eichel; K Kragen; L Leber.

Die Haut besteht überall aus einem hohen Wimperepithel, das an den meisten Stellen reich an Drüsenzellen ist. Diese sondern im Leben ein starkes schleimiges Sekret ab, das das Tier einhüllt und auch gegen den Meeresboden, in dem es lebt, abschließt, so daß es dort förmlich in einer Schleimröhre liegt, aus der es auf- und absteigt und aus deren einer Oeffnung es seine Exkremente auswirft.

Legt man ein lebendes Tier auf den Boden, so gräbt es sich darin in kurzer Zeit ganz ein, und zwar mit der Eichel voran, der darauf Kragen und Rumpf folgen. Besonders lebhafte, an die Darmperistaltik erinnernde Bewegungen führen dabei Eichel und Kragen aus, die sicher wesentlich den Lokomotionsapparat bilden. Verständlich werden diese Bewegungen erst, wenn man das Verhalten der in den verschiedenen Körperabschnitten befindlichen Hohlräume und ihrer Außenwandungen kennen gelernt hat. Ein solcher befindet sich in der Eichel und ferner je ein Paar im Kragen und im Rumpfe. Von diesen Cölomen sind also in der Eichel eins und je zwei im Kragen und im Rumpf vorhanden, alle durch geschlossene Scheidewände voneinander getrennt. Davon stehen das Eichelcölom und die Kragencölome mit der Außenwelt in offener Verbindung durch kurze Kanäle, sogenannte Pforten (Eichel- und Kragenpforten), die erstere an der dorsalen Seite des Eichelhalses, die letzteren am Hinterrande des Kragens gelegen. Meistens ist nur eine Eichelpforte vorhanden, bei gewissen Enteropneusten aber ein Paar, die beide mit dem einen Eichelcölom in Verbindung stehen, während jedes Kragencölom immer eine eigene Kragenpforte besitzt. Durch diese Pforten wird Wasser in das Innere der Cölome aufgenommen und diese und mit ihnen zugleich der ganze betreffende Körperabschnitt geschwellt. Die Rumpfcölome besitzen solche Pforten nicht, sondern sind ganz nach außen abgeschlossen. Alle Cölome aber besitzen in ihrer Außenwand

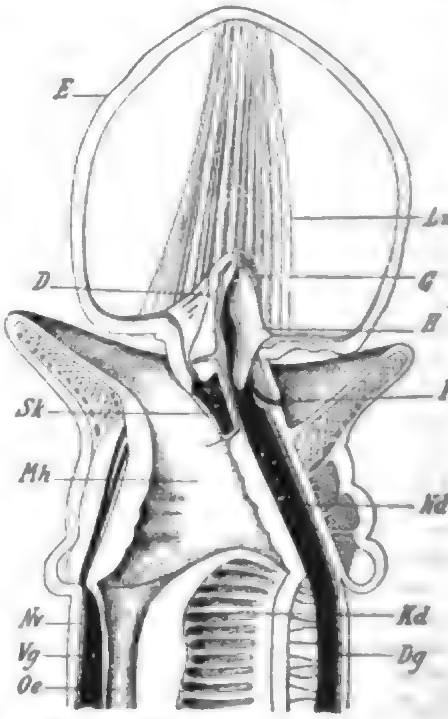


Fig. 2. Eichel, Kragen und vorderster Teil der Kiemenregion von Glossobalanus minutus (Kow.), sagittal halbiert. Aus Claus-Grobben. D Eicheldarm, durch ein ventrales Eichelseptum an der Eichelwand befestigt; Dg Rückengefäßstamm, sich zwischen den Perihämalkanälen bis an die Eichel fortsetzend und dort mit dem zentralen Blutraum zwischen Herzblase und Eicheldarm sich vereinigend; ventral gehen von Dg Aeste an den Kiemendarm ab; E Eichel; G Glomerulus; H Herzblase oder Perikard; Kd Kiemendarm; Lm Kante der Längsmuskelblätter der Eichel; Mh Höhle des Kragendarms; Nd Kragenmark, sich in den Rumpf als Rückennervenstamm fortsetzend; Nv Bauchnervenstamm; Oe Oesophagus; P Porus der Eichelpforte; Sk Eichelskelett; Vg Bauchgefäßstamm, aus dem Kragen die rückführenden Gefäße der Eichel aufnehmend.

Digitized by Google

stark entwickelte Muskulatur, das Eichelcölom zu äußerst eine schwache Lage von Ringfasern und starke innere Längsfasern, die Kragencölome komplizierter angeordnete Muskeln (s. unten) und der Rumpf ebenfalls schwache äußere Ringfasern (die fehlen können) und eine stets kräftige Längsmuskulatur, wozu bei gewissen Enteropneusten sich noch innere Muskelfasern gesellen (s. unten). Die Cölommuskelmassen der Eichel und des Kragens führen die oben erwähnten Bewegungen dieser Körperteile aus und bewirken dadurch die Lokomotion, während der Rumpf wesentlich nur nachgezogen wird.

Auch die Eichel entbehrt des Darmkanales nicht gänzlich, indem sich vom Mundhöhlenepithel des Kragens ein Blindsack abzweigt, der sich durch den Eichelhals hindurch mehr oder weniger weit in die Eichel hinein vorstülpt, deshalb Eicheldarm genannt. Er sondert sich in einen flachgedrückten stielartigen Halsabschnitt, einen davor gelegenen sehr viel mächtigeren und meistens sehr dickwandigen Körper, der ventralwärts ein Divertikel abgehen läßt und sich nach vorn zu allmählich verjüngt, um bei gewissen Formen, ehe er blind geschlossen endigt, in einen fadenförmig dünnen Fortsatz, den Wurmfortsatz, auszugehen. Dieser ganze Eicheldarm liegt in einer tiefen Nische der nach hinten gewandten, nahezu muskelfreien Wand des Eichelcöloms, füllt aber diese nicht allein aus. Vielmehr nimmt diese dorsal vom Körper des Eicheldarms noch ein Gebilde auf, das ähnlich einem Cölom einen Hohlraum, zellige Auskleidung und einen gewissen zelligen Inhalt, besonders in seiner Wand Muskelfasern besitzt, aber nie durch eine Pforte sich nach außen öffnet, sondern immer rings geschlossen ist (Herzblase oder Pericard, s. u.). Vom Körper des Eicheldarms bleibt diese Blase immer durch einen Spalt getrennt, dessen dorsoventraler Durchmesser um so höher wird, je mehr sich die ihm anliegende Wand der Blase in deren Innenraum hinein vorwölbt.

Dieser Spalt ist von einer farblosen und nur wenige Zellen enthaltenden Blutflüssigkeit erfüllt und stellt in gewisser Beziehung das Zentrum des Blutgefäßsystems dar, zu dessen Verständnis zunächst eine Besprechung der Begrenzung sämtlicher kurz aufgeführten Organe gegeneinander erforderlich ist, was am besten an der Hand eines Querschnittes durch den Hinterleib (Fig. 3) geschieht. Ein solcher zeigt uns in der Mitte den Darmkanal, umgeben von den beiden ihn bogenförmig von rechts und links umfassenden Rumpfcölomen; nach außen werden diese umschlossen vom Hautepithel. Nun befindet sich überall zwischen diesen aneinander angrenzenden Organen, also zwischen Darm und Innenwand des Cöloms, zwischen Außenwand des Cöloms und dem Hautepithel und endlich dorsal und ventral zwischen den beiderseitigen Cölomen eine weiche Substanz, die eine ganz dünne Grenzschicht, eine Grenzmembran, dazwischen bildet. Die Blutgefäße sind nichts anderes als Spalten innerhalb dieser Grenzmembran, die an verschiedenen Stellen in bestimmter Ausbildung auftreten, teils längs, teils quer oder in anderer Richtung verlaufen und schließlich untereinander zusammenhängen, so ein System von engeren und weiteren, stets ringsum von Grenzmembran umschlossenen Kanälen bildend. Eine solche ist in dem ganzen Körper der Enteropneusten zwischen allen aneinander angrenzenden Organen vorhanden, also z. B. da, wo die Darmkiementaschen auftreten, zwischen diesen und der Innenwand

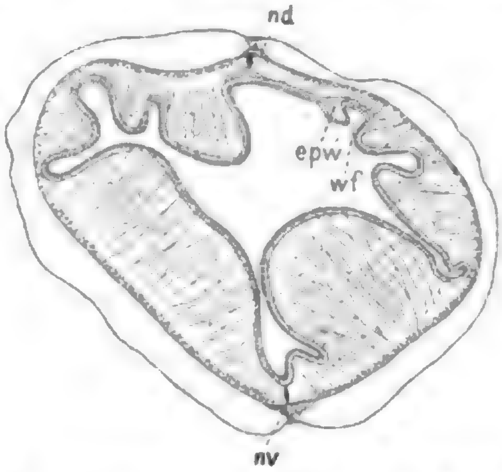


Fig. 3. Querschnitt der Abdominalregion von Glossobalanus minutus (Kow.). epw Deckwulst; nd Rücken-, nv Bauch-Nervenstamm; wf Wimperfurche. Aus Spengel.

des Cöloms. Dementsprechend finden wir sie auch zwischen dem Eicheldarm und der ihm angelagerten Herzblase, und der hier in ihr enthaltene Hohlraum ist besonders erweiterbar (zentraler Blutraum). Im Rumpfe sind derartige besonders weite Spalten in der die Cölompaare der Länge nach trennenden Grenzmembran vorhanden, ein dorsaler und ein ventraler, woraus sich zwei Hauptlängsgefäßstämme ergeben, ein Rücken- und ein Bauchgefäß. Am hinteren Ende des Kragens hängen diese durch ein Ringgefäß in der Scheidewand zwischen den Kragen- und den Rumpfcölomen zusammen.

In sehr eigentümlicher Weise kommt die Verbindung dieser Rumpfgefäßstämme mit dem zentralen Blutraume der Eichel zustande. Bei allen Enteropneusten entsenden zu diesem Behufe die Rumpfcölome

Digitized by Google

von ihrem vorderen dorsalen Ende, dort, wo sie den Rückengefäßstamm zwischen sich fassen, je einen ziemlich schmalen Fortsatz durch den Kragen hindurch, und zwar dem Darm des Kragens dicht anliegend, also zwischen dem Kragendarm und den Kragencölomen, gegen die Eichel zu, meistens deren hintere Grenze, nämlich die ihre Organe von denen des Kragens trennende Grenzmembran, erreichend, bei gewissen Formen aber nur in beschränkterer Ausdehnung (bei Protobalanus sogar nahezu fehlend). Zwischen diesen Perihämalkanälen verlängert sich der Rückengefäßstamm in den ersteren Fällen bis an den zentralen Blutraum und geht in diesen über. Endigen aber (wie in der Gattung Harrimania) die Perihämalkanäle in größerem Abstande von der Eichel, so führt der Gefäßstamm zunächst in einen bluthaltigen Spalt der Grenzmembran zwischen den Kragencölomen und dem Kragendarm, den jene nun unmittelbar berühren, und erst dieser setzt sich dann in den zentralen Blutraum fort.

Regelmäßig kommuniziert der ventrale Rumpfgefäßstamm derartig indirekt mit dem zentralen Blutraum, daß sich bogenförmig verlaufende Gefäße, die in der Grenzmembran zwischen Kragendarm und Cölom gelegen sind, schräg von diesem nach vorn bis zu jenem ziehen.

Außer diesen Hauptgefäßstämmen und ihren Verbindungen treten andere, vor allem unter dem Hautepithel, unter dem Darmepithel, in den Grenzmembranen zwischen den Gonaden und den Rumpfcölomen reichlich entwickelte Gefäßnetze auf (Einzelheiten siehe unten), besonders aber ein als Glomerulus bezeichneter Komplex blutführender Spalten zwischen dem Eichelcölom und der Herzblase bzw. dem Eicheldarm.

Wahrscheinlich strömt das Blut in den Hauptstämmen folgendermaßen. Durch den Rückenstamm aus dem Rumpfe in den zentralen Blutraum getrieben, fließt es durch die beiden bogenförmigen Schlingen von der Eichel durch den Kragen hindurch zum Vorderende des Bauchstammes des Rumpfes, der seinerseits das Blut durch querverlaufende Gefäße an Darm und Hautepithel weitergibt, durch die es wieder in den Rückenstamm zurückgelangt.

Wie der Rückengefäßstamm sich bis an die Eichel, der Bauchgefäßstamm aber nur bis an den Kragen erstreckt, so gilt das auch von den Hauptstämmen des Nervensystems. Dieses gehört, wenn wir zunächst von dem Auftreten an gewissen Stellen des Darmkanales absehen, ganz und gar dem Hautepithel an. Zwischen dessen indifferenten oder drüsigen Zellen finden sich Nervenzellen, die ihre Fortsätze an den Grund des Epithels senden, wo sie eine Faserschicht bilden. Besonders reich sind Zellen und Fasern nahe der dorsalen und der ventralen Mittellinie entwickelt, wo dadurch die ganze Länge des Rumpfes durch-

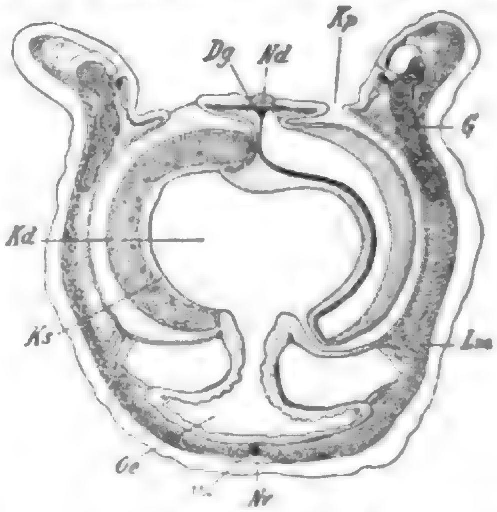


Fig. 4. Querschnitt durch die Kiemenregion von Balanoglossus apertus Spgl. links ein Kiemenseptum, rechts eine Kiemenzunge treffend. Aus Claus-Grobben. Dg Rückengefäßstamm, von ihm ein Gefäß in die Kiemenzunge abgehend; G Gonade, deren Porus an der medialen Seite der Genitalpleure sichtbar ist; Kd Kiemendarm; Kp Kiemenporus; Ks Kiemenseptum, in der eine Kiemenskelettzinke mit quer durchschnittenen Synaptikeln und nach außen davon die Wand der Kiementasche zu sehen ist; Lm Längsmuskulatur; Nd Rücken-, Nv Bauch-Nervenstamm; Oe Oesophagus; Vg Bauchgefäßstamm.

ziehende Nervenstämme, ein Rücken- und ein Bauchstamm, entstehen, die beide am Hinterrande des Kragens durch bogenförmige Züge ineinander übergehen, die durchaus die gleichen Beziehungen zum Hautepithel bewahren. Während aber der Bauchstamm hier endigt, reicht der Rückenstamm bis zur Eichel, um sich schließlich in das nervöse Hautepithel dieser fortzusetzen. Auf dieser durch den Kragen führenden Strecke aber gibt er seine bisherige Beziehung zum Hautepithel auf, indem er sich von diesem als ein selbständiger kräftiger, von Nervenzellen und -fasern gebildeter Strang abtrennt und der dorsalen Fläche der Perihämalkanäle auflagert, die er ungefähr bedeckt und auf der er sich bis zur Vorderwand des Kragens begibt, wo er sich wieder mit dem Hautepithel verbindet. Dieser der Länge nach durch das Innere des Kragens, nämlich zwischen den Perihämalkanälen und den Kragencölomen, verlaufende Abschnitt des dorsalen Nervenstammes heißt das Kragenmark.

Zur Ausbildung von höheren Sinnes-

Digitized by Google

organen (Augen, statischen Organen) kommt es bei keinem Enteropneusten. Sensorische Funktionen von nicht näher bekannter Natur dürfen nur für gewisse Epithelzellen der Haut, wohl hauptsächlich an der Eichelbasis, angenommen werden.

Alle bis jetzt bekannten Enteropneusten sind getrennten Geschlechts. Ihre Gonaden scheinen nach dem bisher darüber Festgestellten im vorderen Teile des Rumpfes auf der dorsalen Seite rechts und links innerhalb der Grenzmembran zwischen Hautepithel und Cölom aufzutreten und erst später eine Verbindung mit ersterem einzugehen, wobei an der oder den Verschmelzungsstellen je eine Ausmündung entsteht (Genitalporus). Indem sie bedeutend an Größe zunehmen, drängen sie die Cölomwand vor sich her, so daß sie schließlich in eine tiefe Nische dieser und damit scheinbar in das Cölom hinein zu liegen kommen.

2. Besondere Ausbildung einzelner Teile. 2a) Kiemen. Wohl kein Organ ist für die Enteropneusten so charakteristisch wie diejenigen, nach denen die Gruppe ihren Namen erhalten hat, nämlich die Kiemen. Diese sind in sehr wechselnder Zahl auftretende paarige taschenförmige Aussackungen des dorsalen Teiles des Darmkanales der vordersten Rumpfregion, die sich durch je einen engen spaltförmigen, meistens kurzen, nur in der Gattung Ptychodera über den größeren Teil der Kiementasche sich erstreckenden Kiemenporus nach außen öffnen. Von diesen kann man; soweit sich nicht (bei vielen Ptychoderiden) seitliche, von Gonaden ausgefüllte Körperfalten (Pleuren, Genitalflügel) medialwärts über sie hinüber krümmen, jederseits eine Längsreihe erkennen. Nach hinten zu rücken die Poren immer näher aneinander heran, entsprechend der Tatsache, daß die Kiementaschen selbst gegen das Hinterende der Kiemenregion an Größe und Entwickelungshöhe abnehmen, weil dort beständig weitere in Entstehung begriffen sind.

Während jede Kiementasche in der geschilderten Weise sich nach außen durch einen Porus öffnet, wird ihre Verbindung mit dem Innern des Darmkanales durch einen U-förmigen Spalt hergestellt, indem von dem dorsomedialen Rande jeder Tasche ein als Zunge bezeichneter handschuhfingerförmiger Fortsatz ausgeht, der sich in die innere Oeffnung legt und ihr die eigentümliche Gestalt gibt. In den Gattungen Protobalanus, Harrimania, Dolichoglossus (Saccoglossus), Willeya, Stereobalanus und Glandiceps liegt die Zunge frei in der inneren Oeffnung, wohingegen sie bei Schizocardium, Spengelia und den Ptychoderiden durch zahlreiche feine Querbrücken (Synaptikel), die durch den U-förmigen Spalt hindurchgehen, befestigt sind. Entsprechend der Wölbung der Außenwand des mit den Kiementaschen besetzten Teiles des Darmes sind sowohl die inneren Oeffnungen der Kiementaschen als auch die Zungen mehr oder weniger bogenförmig gekrümmt.

Die einzelnen Kiementaschen folgen äußerst dicht aufeinander, so daß die Wand der nächstfolgenden in einer gewissen Ausdehnung die voraufgehende berührt. Soweit dies der Fall ist, werden sie getrennt durch eine verdickte Grenzmembran (Fig. 5), die

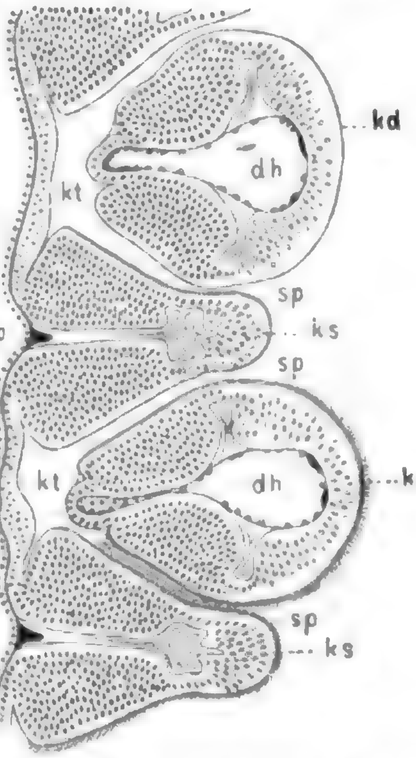


Fig. 5. Querschnitt durch zwei Kiemen von Harrimania kupfferi (v. W.-S.). cöp Rumpfcölom; dh Höhle der Kiemenzunge kd; ks Kiemenseptum; kt Kiementasche; sp Kiemenspalte. Aus Spengel.

sich an der Außenwand des U-förmigen Spaltes bis nahe an den bogenförmigen Abschluß erstreckt, hier aber auf eine kurze Strecke wieder dünn wie gewöhnlich wird. An dem dorsalen Ende der Kiementasche aber zieht sich diese Verdickung im Bogen auch in den Hohlraum der Zunge jederseits hinein, als die Grenzmembran zwischen dem Epithel dieser und dem in sie hineindringenden Fortsatz des Cöloms. Auch diese Verdickungen hören nahe den Ende der Zunge auf. Die Folge des geschilderten Verhaltens der verdickten Grenzmembran ist das Auftreten von ziemlich festen Gebilden von der Gestalt dreizinkiger Gabeln: die Mittelzinke liegt immer in der Scheidewand zwischen je zwei Kiementaschen und spaltet

Digitized by Google

sich an ihrem ventralen Ende in zwei gebogene auseinanderweichende Zipfel, während je eine Seitenzinke unter der Hinterwand einer und unter der Vorderwand der nächstfolgenden Kiemenzunge gelagert ist. Wo Synaptikel vorhanden sind, werden auch diese von einer durch verdickte Grenzmembran gebildeten Achse gestützt, die von einer Zinke zur anderen geht.

Soweit die Zinken reichen, sind die Kiementaschen wie die Zungen von einem stark bewimperten hohen Epithel bekleidet, das offenbar dazu dient, einen Wasserstrom aus dem Darm durch die Kiementaschen nach außen zu unterhalten; der Rücken der Zungen und die Kanten der Scheidewände der Kiementaschen sind von einem meist ebenfalls hohen, gewöhnlich drüsenhaltigen Epithel bekleidet, der Boden der Zungen aber und das Innere der übrigen Kiementaschen von einem niederen Epithel mit jedenfalls nur schwach ausgebildeten Wimpern. Bei einigen Balanoglossus-Arten gehen von den Kiementaschen lange Blindsäcke aus, die sich zwischen der Längsmuskulatur des Rumpfes und dem nicht von Kiementaschen besetzten Teile des Darmes der Kiemenregion weit herabsenken.

Ob diese Kiemen tatsächlich im Dienste der Respiration stehen oder ob nicht vielmehr die Haut, unter der immer reich entwickelte Gefäßnetze vorhanden sind — weit stärkere jedenfalls, als man sie in der Wandung der Kiementaschen findet, soweit diese von niedrigem Epithel ausgekleidet sind —, diese Aufgabe übernimmt, ist nach den bisherigen Kenntnissen nicht sicher zu entscheiden.

2b) Darmkanal; Leberregion; Darmpforten; Nebendarm. Für den vordersten Abschnitt des Darmkanales des Rumpfes ist die Sonderung in den von den Kiementaschen besetzten dorsalen und den derselben entbehrenden ventralen sogenannten Oesophagus überall sehr charakteristisch. Beide stehen oft nur durch einen engen Spalt miteinander in Zusammenhang. Nahrung findet man nur im ventralen, während der dorsale in der Regel nur reines Wasser enthält. Aber bei den meisten Enteropneusten erstreckt sich diese Sonderung in einen dorsalen und einen ventralen Abschnitt auch noch eine wechselnde Strecke weit in den auf die Kiemenregion folgenden Körperabschnitt hinein, indem der dorsale Teil auch hier noch zunächst als sogenannter postbranchialer Darm eine von dem ventralen deutlich abgesetzte ziemlich enge und tiefe Rinne darstellt, die von einem hohen, an Drüsenzellen reichen Epithel ausgekleidet ist.

Erst nachdem diese Rinne aufgehört hat, treten im Darmkanal sehr einfache Verhältnisse ein, indem das Lumen mehr oder weniger kreisförmig oder oval auf dem Querschnitt wird, allerdings modifiziert durch oft in sehr regelmäßiger Weise aufeinander folgende schräg gestellte Falten und Einbuchtungen.

Sehen wir zunächst ab von einigen Komplikationen, die bei gewissen Gattungen in diesem Abschnitt auftreten, so finden wir die ersten erheblichen Veränderungen in dem etwa durch das Aufhören der Gonaden gekennzeichneten Körperteil. Hier wird das Darmepithel sehr hoch zylindrisch, und in ihm treten grünliche bis bräunliche Tröpfchen auf. Es beginnt die Leberregion. Bei Harrimania und Dolichoglossus kann man in ihr von einer leichten seitlichen Schlängelung des Darmkanales reden, die aber immer sehr gering bleibt, so daß dieser nicht viel länger als das Hautrohr wird. Immerhin zeigt sich darin sehr deutlich die Wirkung einer Vermehrung der Leberzellen, und zwar namentlich im dorsalen Teil. Stärker aber ist diese bei Schizocardium und den Ptychoderidae. Hier schieben sich die Leberzellen vorzugsweise dorsal zusammen und rücken dort rechts und links in tiefe Blindsäcke hinein, die sich, das Hautepithel vor sich vorwölbend, weit über die Körperoberfläche hervordrängen als äußerlich sichtbar werdende Lebersäckchen (Fig. 6), welche die Leberregion dieser Tiere zu einem sehr ausgeprägten Körperabschnitt machen (Fig. 1). Die vordersten sind im Leben bräunlich, die

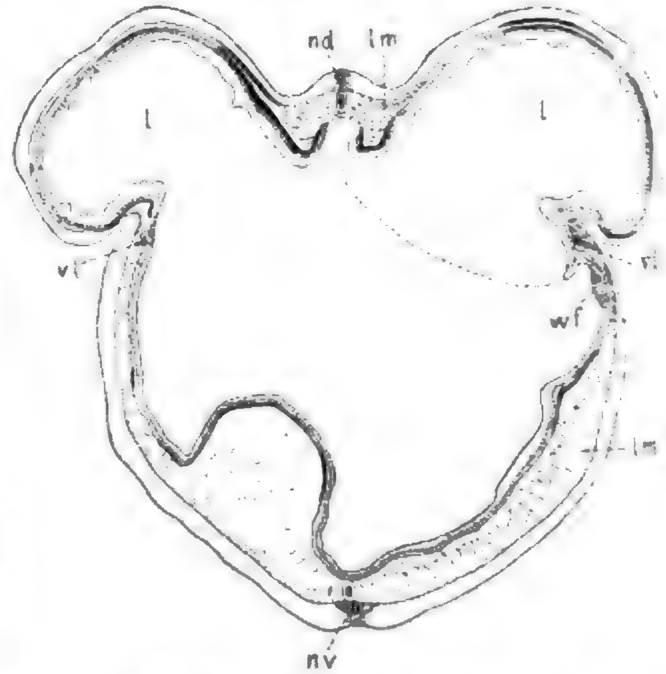


Fig. 6. Querschnitt der Leberregion von Glossobalanus minutus (Kow). l Lebersäckchen; lm Längsmuskulatur; nd Rücken-, nv Bauch-Nervenstamm; vl lateraler Gefäßstamm; wf Wimperfurche. Aus Spengel.

Digitized by Google

mittleren mehr oder weniger gallengrün, während die hinteren, die auch nach und nach an Größe abnehmen, allmählich farblos werden.

Außer den Lebersäckchen kennzeichnet die Leberregion der Ptychoderiden noch ein Paar von longitudinalen Epithelstreifen der Darmwandung — bei Glossobalanus minutus nur der rechte ausgebildet —, die mit starken Wimpern besetzt sind und dadurch eine Wimperrinne darstellen, daß lateral davon das Epithel sich zu einem diese oft mehr oder weniger bedeckenden Längswulst verdickt (Fig. 3, 6). Da diese Wimperrinnen sich hart am lateralen Rande der Lebersäckchen befinden, ja manchmal sich etwas in diese hineinziehen, darf man wohl annehmen, daß sie dazu dienen, die verdaulichen Bestandteile der aufgenommenen Nahrungsmassen, die immer zum großen Teil aus anorganischen Bodenbestandteilen (Sand, Korallenkalk, Schlamm usw.) bestehen, in die Lebersäckchen hineinzuführen, so daß sie dort verdaut und resorbiert werden können. Dem letzteren Vorgang dürfte das auf den Lebersäckchen immer vorhandene reiche Gefäßnetz dienen. Wimperrinne und Deckwulst verstreichen allmählich nach hinten zu im Bereiche der Abdominalregion, in deren hinterstem, als Schwanz bezeichneten Abschnitt sie immer fehlen. Im hintersten Teil der Abdominalregion erstreckt sich bei den Ptychoderiden das Darmepithel der ventralen Seite als ein dünner, schmaler, solider Kiel — gelegentlich mehrfach unterbrochen —, der an seinem ventralen Ende bisweilen stabförmig verdickt ist, bis dicht an die Haut (von Willey Pygochord genannt).

Sehr eigentümliche Einrichtungen, deren physiologische Bedeutung einstweilen noch völlig dunkel ist, treffen wir bei den meisten Gattungen — nie bei Ptychoderidae — im Bereiche des Darmkanales der Genitalregion. Hier kommen zunächst kurze Kanäle in Betracht, durch die der Darm mit der Haut in Verbindung steht und sich auf der dorsalen Körperseite nach außen öffnet, sogenannte Darmpforten. Sie treten entweder nur an einer Stelle auf (Harrimaniidae und Spengelia) und sind dann paarig, oder an zwei durch einen mehr oder weniger langen Zwischenraum voneinander getrennten: dann sind die vorderen unpaarig, die hinteren paarig. Gegen das Darmlumen sind sie etwas trichterförmig erweitert und oft durch eine ringförmige Verdickung der Grenzmembran beständig offen gehalten, während sich nahe an ihrer äußeren, immer engen Oeffnung ein Schließmuskel finden kann. Ihre Zahl ist erheblichen, wohl auch individuellen Schwankungen unterworfen. Die unpaarigen finden sich teils rechts, teils links, meist überwiegend auf einer Seite. Bei einigen Glandiceps-Arten wird der Darmkanal der hinteren Körperregion von einem langen, engen Nebendarm begleitet, der dorsal vom Hauptdarm hinzieht.

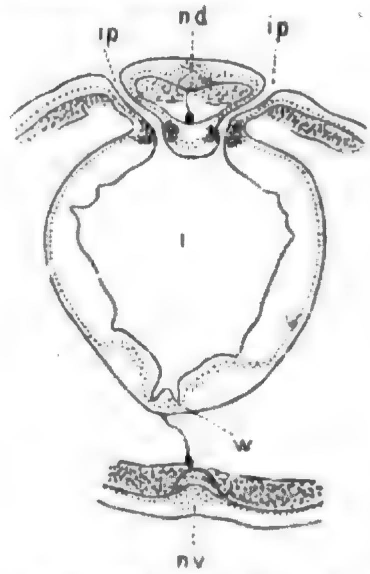


Fig. 7. Querschnitt aus dem vorderen Teil der Leberregion von Glandiceps eximius Spgl., mit paarigen Darmpforten (ip). i Darmlumen; nd Rücken-, nv Bauch-Nervenstamm. Aus Spengel.

Auf weitere besondere Ausbildungen der Darmwand (Epithelzotten, Epithelwülste usw. mit großem Reichtum an Drüsenzellen usw.) in dieser Region kann hier nicht näher eingegangen werden.

Endlich bleibt noch das an die Mundöffnung sich anschließende, den Kragendarm auskleidende Epithel zu besprechen (Fig. 2). Das der vorderen trichterförmigen Fortsetzung gleicht mehr oder weniger dem äußeren Hautepithel, geht aber ohne scharfe Grenze in das des hinteren Teiles über, wo es an Drüsenzellen arm oder nur nahe seiner Oberfläche von solchen durchsetzt ist. Etwa auf der Grenze befindet sich die mehr oder weniger spaltförmige Ausmündung des Eicheldarmhalses.

2c) Grenzmembran und Skelett. Mehr Aufmerksamkeit als das Epithel verlangt hier die Grenzmembran zwischen jenem und dem Kragencölom. Die beiden Ecken der Eicheldarmmündung sieht man sich in je eine Furche fortsetzen (Fig. 2), die jederseits bogenförmig ventralwärts und nach hinten zieht, meist bis nahe dem hinteren Kragenende, bei den Ptychoderiden etwa in der Kragenmitte endigend. Längs jeder dieser Rinnen zeigt die Grenzmembran eine auf dem Querschnitt ovale Verdickung, d. h. jede von diesen stellt einen gebogenen Schenkel dar, der sich gegen die Eichel-

Digitized by Google

darmmündung erstreckt. Sie dürften unzweifelhaft dazu dienen, das Kragenlumen und damit den Mund stets geöffnet zu halten. Nachdem sie sich berührt haben, verschmelzen sie miteinander zu einem unpaarigen Körper, der sich als eine bedeutende Verdickung der Grenzmembran zwischen dem Eicheldarmhalse und dem Hautepithel des Eichelhalses darstellt und dessen wechselnde Form — bald breiter, bald schmäler, median oft mit einer kiel- oder kammförmigen Erhöhung versehen — von derjenigen der begrenzenden Organe und dem Grade, in dem sich beide an der Absonderung der Grenzmembransubstanz beteiligen, abhängt. So entsteht ein relativ sehr fester Skelettkörper, das Eichelskelett, der sich nach vorn zu unter dem ventralen Divertikel des Eicheldarmkörpers plattenartig verbreitert, um aber von da aus sich nach den Rändern stark zuzuschärfen und endlich wieder in die gewöhnliche dünne Grenzmembran der Eichelhaut überzugehen.

Mehr oder weniger pflegt dieses Skelett durch Anlagerung von weiteren Grenzmembranmassen, die seitens der angrenzenden Cölome, namentlich der vorderen Enden der Kragencölome, hinzutreten und erhebliche Mengen von Zellen und Muskelfasern in sich einschließen — daher eine gewisse Aehnlichkeit ihres Gewebes mit Knorpel, „chondroide Substanz" —, verstärkt zu werden, manchmal in so hohem Grade, daß das ursprüngliche Skelett nur noch als ein fast davon umhüllter Kern erscheint.

Da der Hals der Eichel fast immer sehr dünn ist, erhält die als Lokomotionsorgan so wichtige Eichel durch die Anwesenheit des Skeletts an ihrem Grunde eine wesentlich erhöhte Festigkeit. Bei dem Eingraben in den Boden mag auch der kielförmigen Erhebung des Skelettkörpers (Zahn) eine Bedeutung als auseinandertreibender Keil zukommen.

Ob die Bedeutung des Eicheldarmes sich wesentlich in ihrem Anteil an der Absonderung des Skeletts einerseits und der Begrenzung des zentralen Blutraumes, der zwischen seinem Körper und der Herzblase gelegen ist, andererseits erschöpft, oder welche Funktionen ihm außerdem noch zukommen mögen, etwa die einer axialen Stütze der Eichelbasis, kann zurzeit kaum beurteilt werden. Auf letzteres weist immerhin die Existenz eines langen Wurmfortsatzes hin. Sicher dürfte das Gewebe des Eicheldarmkörpers fast immer eine gewisse Starrheit haben; denn sein Lumen ist mehr oder weniger — auch im Bereiche des Wurmfortsatzes — reduziert, seine Wandung durch eine eigentümliche blasige Beschaffenheit ihrer Zellen sehr verdickt, so daß auf Schnitten eine gewisse Aehnlichkeit mit dem Gewebe der Chorda dorsalis (Notochord) der Wirbeltiere entsteht, was Veranlassung gegeben hat, in dem Eicheldarm eine solche zu erblicken (s. unten).

2d) Mesenterien. Dadurch, daß im Kragen und im Rumpf zwei Paare von Cölomen vorhanden sind, erklärt sich in beiden Körperabschnitten die Anwesenheit eines dorsalen und eines ventralen Mesenteriums. Diese erfahren aber vielfache Reduktionen, so daß die beiderseitigen Cölome auf verschieden großen Strecken miteinander in Verbindung treten. Der Zustand im Kragen ist in dieser Beziehung, zum Teil auch individuell, so wechselnd, daß hier die Hervorhebung der Tatsache genügen muß, daß in der über den Ursprung der Eichel hinausgehenden Verlängerung nach vorn die Mesenterien stets fehlen. Im Rumpfe bleibt das ventrale Mesenterium immer ganz niedrig und wird in seiner vollen Breite vom Bauchgefäßstamm eingenommen. Auf der dorsalen Seite erlangt es dagegen oft eine viel bedeutendere Breite als der Rückengefäßstamm, kann aber bis auf diesen völlig schwinden.

Trotz der Anwesenheit nur eines Cöloms in der Eichel kommt es aber auch hier zur Ausbildung eines dorsalen und eines ventralen Mesenteriums von allerdings oft geringer Ausdehnung, indem offenbar bei dem Vorwachsen des Eicheldarms die Hinterwand des Cöloms in eine dorsoventrale Falte gelegt wird, die die Mesenterien liefert. Das ventrale Mesenterium erlangt namentlich bei denjenigen Formen, die einen Wurmfortsatz des Eicheldarms besitzen, eine sehr beträchtliche Länge, während es bei dem Mangel eines solchen immer sehr kurz ist. Das dorsale ist, da seinen Platz die Herzblase einnimmt, immer nur kurz oder fehlt vor dieser meistens ganz.

2e) Muskulatur; Perihämal- und Peripharyngealräume. Die geschilderten Verhältnisse der Mesenterien haben einen leicht verständlichen Einfluß auf die Muskulatur, über deren allgemeine Anordnung in den Außenwänden der Cölome oben die Haupttatsachen angegeben sind. An Einzelheiten sei folgendes erwähnt.

Die Längsmuskulatur der Eichel ist sehr mächtig entwickelt. Ihre Fasern entspringen am Eichelgrunde an der äußeren Grenzmembran und heften sich in den verschiedensten Höhen der Außenwand ebenso wieder an bis fast hinauf zur Eichelspitze. Bei einigen Dolichoglossus-(Saccoglossus-) Arten kommen sie dabei auf Querschnitten in Kreisen zu liegen, während man gewöhnlich keine bestimmte Anordnung erkennt. Dagegen macht sich bei Ptychoderiden oftmals ein Zerfall der Längsmuskel-

Digitized by Google

masse in radiäre Blätter bemerklich. In der Achse der Eichel bleibt immer ein Gebiet von verschiedener Ausdehnung frei von Längsmuskelfasern und wird von einem mehr oder weniger dichten Bindegewebe eingenommen, das nach hinten ebenfalls aufhört und einem Hohlraum Platz macht, in den Eicheldarm, Glomeruli usw. hineinragen, von der dünnen, meist epithelialen Wand des Eichelcöloms bedeckt (Fig. 2). Dann und wann treten außer den Längsmuskelfasern noch gelegentlich kräftige, dorsoventrale Fasern zu beiden Seiten der erwähnten Mesenterien auf. Dagegen ist es fraglich, ob wirklich radiäre Fasern vorhanden sind und die Existenz solcher nicht nur durch den oft bogenförmigen Verlauf der Längsmuskelfasern vorgetäuscht wird.

In der ventralen Wand der Herzblase ist besonders Quermuskulatur kräftig entwickelt, die durch ihre Kontraktion eine Abflachung dieser Wand und damit eine Austreibung des Blutes aus dem zentralen Blutraum bewirkt.

Von den beiden übrigen Körperabschnitten hat der Rumpf die einfachste Muskulatur. Die innere dünne, bei Harrimaniiden fehlende Ringmuskelschicht umfaßt immer den ganzen Körper, indem ihre Fasern zwischen der Haut und den Gefäßstämmen quer von einer Seite zur anderen ziehen. Die sehr viel stärkere Längsmuskulatur, die nach innen von jener liegt, kommt aber stets gesondert dem rechten und dem linken Cölom zu, indem ihre Schicht dorsal wie ventral gegen das Mesenterium hin sich verliert. Die Stärke der Längsmuskelschicht ist gewissen regelmäßigen Schwankungen unterworfen. So ist sie bei den Ptychoderiden, die Pleuren oder Genitalflügel besitzen, immer an deren medialer Seite sehr dünn, an der lateralen dick. Vor allem aber ist bei vielen Enteropneusten auf der dorsalen Seite des Thorax jederseits ein schmaler Streifen ganz muskelfrei, wodurch eine „Submedianlinie" markiert wird. In dieser liegen die Genitalporen und bei vielen Gattungen auch die Kiemenporen, während diese bei den Ptychoderiden medial von den Genitalporen die Längsmuskulatur derartig durchbrechen, daß zwischen je zwei Poren ein Längsmuskelbündel aus seinem longitudinalen Verlauf lateralwärts abgelenkt wird.

Eine weitere Modifikation der Längsmuskulatur steht bei den Ptychoderiden in Zusammenhang mit der Ausbildung einer eigentümlichen Scheidewand, die das Lateralseptum genannt wird und auf diese Familie beschränkt ist. Dieses beginnt in wechselndem Abstand vom Vorderende der Kiemenregion als eine dünne Membran, die von der Submedianlinie zu einer weiter medialwärts gelegenen Linie ausgespannt ist, zwischen jener und den Kiemenporen (s. Fig. 3). Je weiter nach hinten, um so mehr nähert sich die letztere Linie den Kiemenporen, um hinter deren letztem von der Haut ab und an den Darmkanal überzutreten, sodaß nunmehr das Lateralseptum als eine schräge, durch das Rumpfcölom gespannte Scheidewand erscheint, die den Darmkanal mit der Submedianlinie verbindet. Vor der Leberregion endigt es mit freiem hinteren Rande. Soweit es vorhanden ist, scheidet es demnach das Rumpfcölom jederseits in eine größere seitliche und ventrale Haupt- und eine kleinere mediale Dorsalkammer, die sich beide am Hinterrand des Septums wieder miteinander vereinigen. Da sich am vorderen Ende der laterale Ansatz in der Submedianlinie mit dem medialen vereinigt, so geht daraus hervor, daß die Dorsalkammer vorn blind geschlossen ist. Sie ragt verschieden weit gegen das Vorderende des Rumpfes hin. Für die Muskulatur aber hat das geschilderte Verhalten die Folge, daß diese, indem der Dorsalkammer eine eigene, durch das Lateralseptum abgetrennte Längsmuskulatur zukommt, auf der dorsalen Seite in einem der ersteren angehörigen medialen Teil und einen lateralen zerfällt. Die Beziehungen des Lateralseptums zu den Gonaden werden bei diesen besprochen werden.

Die Muskulatur der Innenwand der Rumpfcölome ist nur eine schwache Darmmuscularis, die teils nur als Ring-, teils als Ring- und Längsmuskulatur ausgebildet ist und auf die Kiementaschen wie auf die Lebersäckchen sich erstreckt.

Besonderes Interesse nimmt die Muskulatur im Bereiche der Mesenterien in Anspruch, in welchen ja die Gefäßstämme enthalten sind, in deren Umfang allein sie ausgebildet ist. Hier tritt sie nämlich in Gestalt von Dorsoventralfasern auf, die sich bogenförmig an jede Seite des Gefäßstammes anlegen und so für diese eine sie ringförmig umfassende Muskulatur liefern, die einzige, die diesen, soviel bekannt, eigen ist. Gegen die Cölomhöhle liegen darauf hohe, locker geordnete Zellen, während das übrige Peritoneum aus niedrigen, an der Innenseite der Längsmuskulatur sogar ganz platten und von dem die Muskelfasern zusammenhaltenden Bindegewebe nicht deutlich zu trennenden Zellen besteht; nur im Bereiche der muskelfreien Submedianlinie und auch wohl auf dem Darm sind sie hier und da etwas höher.

Zu der besprochenen Muskulatur kommt bei Schizocardium, Glandiceps und Spengelia, denen die äußere Ringmuskulatur fehlt, noch nach innen von der Längs-

Digitized by Google

muskulatur eine kräftige sogenannte innere Ringmuskulatur, deren Fasern aber nicht den ganzen Rumpf umfassen, sondern auf der rechten und linken Seite gesondert sind. Auf ihre komplizierte und gewisse Verschiedenheiten aufweisende Anheftungsweise kann hier nicht eingegangen werden.

Die Muskulatur des Kragens ist ungemein kompliziert; sie besteht einerseits aus den Fasern der Kragencölome selbst, andererseits aus solchen, die Fortsetzungen der Rumpfcölome in den Kragen angehören. Von letzteren sind außer den bereits erwähnten Perihämalkanälen bei den Ptychoderiden zwei ganz flache, mantelartig die ventralen und seitlichen Teile des Kragendarmes umfassende Fortsetzungen vorhanden,

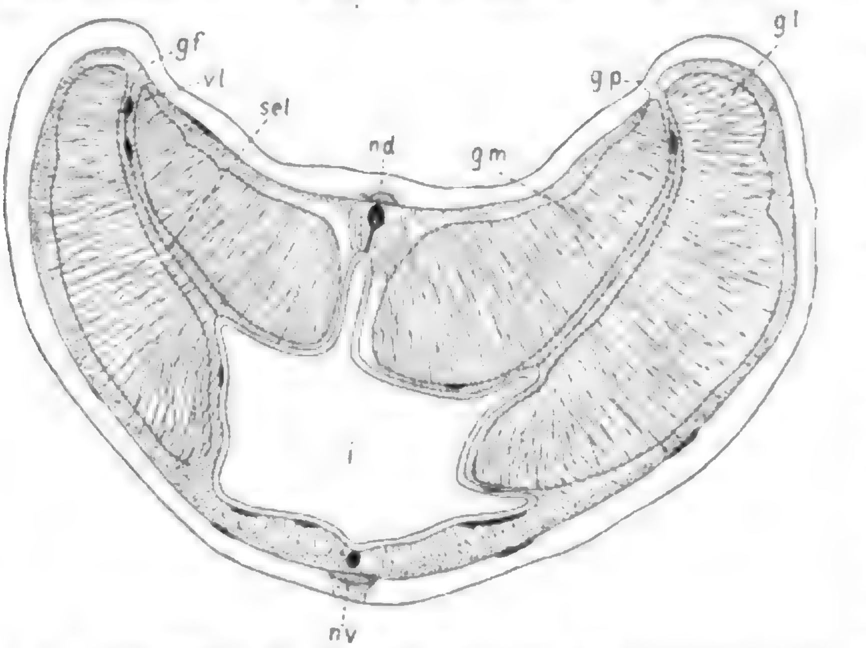


Fig. 8. Querschnitt der Genitalregion von Glossobalanus minutus (Kow.). gf Genitalwulst; gl lateraler, gm medialer Gonadenast; gp Genitalporus; lm Längsmuskulatur; nd Rücken-, nv Bauch-Nervenstamm; sel Lateralseptum. Aus Spengel.

die mit einer Muskulatur ausgestattet sind und als **Peripharyngealräume** bezeichnet werden. Sie ergänzen gewisse Teile der inneren Kragenmuskulatur zu einer Ringmuskelschicht. Die Hauptbestandteile der Muskulatur der Kragencölome sind Längsfasern, die vom hinteren Ende des Kragens entspringen, jederseits nach vorn zum Eichelhals konvergieren und sich dabei an den Schenkeln und weiterhin am Körper des Eichelskeletts anheften, Rückzieher der Eichel darstellend. Andererseits entspringen vom Eichelhals, und zwar aus dem dort vorhandenen chondroiden Gewebe, zahlreiche Fasern, die unter der vorderen inneren Fläche des freien Kragenabschnittes fächerförmig zu dessen Rande ausstrahlen. Dazu kommen hier Ringfasern. Das ganze Innere der Kragencölome endlich ist von Fasern durchzogen, die von der Innen- zur Außenwand und dabei mehr oder weniger von vorn nach hinten oder umgekehrt verlaufen (Radiärfasern). Wie man sieht, ist diese Muskelanordnung in hervorragendem Maße dazu geeignet, der grabenden Tätigkeit des Kragens zu dienen, wobei einerseits der freie, den Mund — mit der Eichel — umschließende Kragenteil in Bewegung versetzt, andererseits die Dicke des Kragens beständigem Wechsel unterworfen wird.

Die Höhle des Kragens ist großenteils von einem lockeren Bindegewebe erfüllt, in dem bisweilen regelmäßige Hohlräume frei bleiben, außerdem meist solche zu beiden Seiten der Mesenterien, soweit diese erhalten bleiben.

2f) Pforten. Im Anschluß an die Cölome seien einige Einzelheiten in bezug auf die **Pforten** erwähnt. Die Eichelpforte — oder, wo deren zwei vorhanden sind, beide — ist immer ein zylindrischer Kanal, der von einem ziemlich hohen Wimperepithel ausgekleidet ist. Der äußere Porus ist meist länglich, von wechselnder Ausdehnung, oft nicht median gelegen, sondern nach links verschoben. Die innere Oeffnung, die ins Eichelcölom führt, ist meistens sehr eng, und das sich daran anfügende Gewebe des letzteren, in dem vielfach ein Ringmuskel auftritt, pflegt unregelmäßig gitterartig zu sein, wodurch das Eindringen größerer fester Teile mit dem der Schwellung der Eichel dienenden Wasser, das durch den Porus aufgenommen wird, verhindert wird. Wo zwei Pforten vorhanden sind, liegt die eine rechts, die andere links, beide gewöhnlich sehr nahe aneinander. Ein solches Auftreten doppelter Eichelpforten findet sich nicht nur als ständige Einrichtung bei den Harrimania-Arten oder bei einzelnen Arten anderer Gattungen (Ptychodera flava, Glossobalanus hedleyi), sondern tritt gelegentlich auch bei einzelnen Individuen einporiger Arten auf, wobei die akzessorische Pforte mehr oder weniger rudimentär bleiben kann und oft nicht in Verbindung mit dem Eichelcölom tritt. Andererseits kann auch eine unpaarige Pforte nicht nur links vom Eicheldarm, sondern auch rechts davon mit dem Cölom

Digitized by Google

kommunizieren oder sich dessen blindgeschlossenem Ende nähern.

Die Kragenpforten (Fig. 9) haben stets eine reicher ausgebildete Gestalt, indem sie nicht zylindrisch sind, vielmehr ihre epitheliale wimpernde Auskleidung längs der dorsalen Wand mit einer leistenförmigen Verdickung oder einer Falte versehen ist, so daß der Querschnitt des Lumens nicht kreisrund oder oval, sondern hufeisenförmig erscheint. Gegen die innere Oeffnung sind die Pforten nicht verengt, sondern weiten sich etwas trichterförmig aus, und dabei ist die eine Lippe des Trichters oft länger als die entgegengesetzte. Ihr Epithel schärft sich schließlich zu und geht in die dünne peritoneale Auskleidung des Kragencöloms über, das die Außenfläche der Pforte überzieht. Die äußere Oeffnung oder der Kragenporus liegt nicht im Hautepithel des hinteren Kragenrandes, sondern in der vorderen Wand der ersten Kiementasche, so daß die Zu- und Abfuhr von Wasser durch deren Porus vermittelt wird.

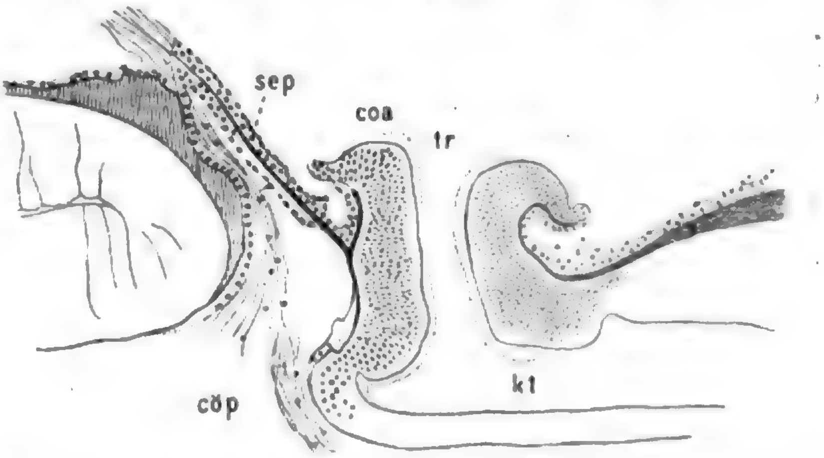


Fig. 9. Längsdurchschnitt durch eine Kragenpforte und ihre Umgebung von Harrimania kupfferi (v. W.-S.). cöa Kragen-, cöp Rumpfcölom; kt erste Kiementasche; sep Kragen-Rumpf-Septum; tr Kragenpforte. Aus Spengel.

Die von Willey behauptete Existenz von Rumpfpforten, die mit dem Innern der Perihämalkanäle kommunizieren und deren Porus ebenfalls in der ersten Kiementasche, und zwar in deren medialer Ecke, liegen soll, haben andere Beobachter nicht bestätigen können.

2g) Nervensystem und Sinnesorgane. Vom Nervensystem bedarf nur das Kragenmark noch einer eingehenderen Darstellung. Es ist ein meist auf dem Querschnitt deutlich abgeplatteter Strang, bestehend aus einer dorsalen von Zellen und einer ventralen von Fasern eingenommenen Masse. Wie weit die ersteren — abgesehen von spärlichen Zellen unzweifelhaft drüsiger Natur — Nerven- oder Glia- und Stützzellen sind, ist unentschieden. Ein unzweifelhaft nervöser Charakter kommt nur wenigen sehr großen Ganglienzellen zu, die je einen starken Fortsatz in die Faserschicht entsenden. Sie sind bei den meisten Enteropneusten und zwar vorwiegend im hinteren Teil des Kragenmarks nachgewiesen worden, dagegen nicht im zelligen Teil des Rücken- oder Bauchstammes oder des Nervenringes.

Im Zellenteil des Kragenmarks liegen entweder sehr zahlreiche, kleine, oft unregelmäßig gestaltete sogenannte Markhöhlen, viele hintereinander und auch auf einem Querschnitt mehrere nebeneinander, davon meist je eine ganz seitlich, oder es findet sich — gelegentlich außer jenen — eine einzige weitere, oft ansehnliche Achsenhöhle, die das Bauchmark der Länge nach durchzieht, aber meist vorn und hinten geschlossen, nur bei gewissen Ptychoderiden an beiden Enden offen ist. Solche Neuroporen finden sich dann am Grunde von flacheren oder tieferen, namentlich am hinteren Ende des Kragens oft sehr tiefen Einsenkungen des Hautepithels. Daß diese sogenannten Vorhöhlen nicht zum Kragenmark gehören, geht daraus hervor, daß sie in jeder Hinsicht den Charakter der anstoßenden Haut tragen, also die vordere den des Eichelhalses auf der ventralen, der Vorderwand des Kragens auf der dorsalen Seite, die hintere auf der ventralen Seite den des Rumpfes, mit median gelagertem Rückennervenstamm, der sich hier mit den von beiden Seiten kommenden Bogen des Nervenringes verbindet, und auf der dorsalen den der angrenzenden Hinterwand des Kragens.

Bei den Ptychoderiden setzt sich die Zellenmasse des Kragens an verschiedenen Stellen durch dickere oder dünnere, bald solide, bald von einem engen Hohlraum durchzogene, bisweilen äußerlich von einer Nervenfaserschicht bekleidete Zellenstränge, sogenannte Wurzeln (Fig. 2), die in sehr wechselnder, gelegentlich bis zu 17 ansteigender Zahl (Glossobalanus ruficollis) vorhanden sein können, mit der Rückenhaut des Kragens in Verbindung. Sind sie hohl, so kann der Kanal bis ins Kragenepithel reichen, durchbohrt dieses aber nie. Nach innen zu pflegt er mit einer Markhöhle oder der Achsenhöhle in Ver-

Digitized by Google

bindung zu stehen. Die physiologische sowohl wie die morphologische Bedeutung dieser Gebilde, die bei anderen Enteropneustenfamilien nicht vorkommen, ist gänzlich unbekannt. Es scheinen bis zur Haut verlängerte Teile eines bei sehr jungen Ptychoderiden vorhandenen fortlaufenden dorsalen Kieles des Kragenmarks zu sein, der sich ähnlich auch bei erwachsenen Dolichoglossus-(Saccoglossus-)Arten findet.

Als ein fragliches Sinnesorgan wird nur bei Stereobalanus canadensis eine Grube des Hautepithels an der dem Munde zugekehrten Fläche der Eichel in der Literatur erwähnt. Sie liegt der ventralen Seite des Eicheldarmkörpers dicht an. Nachforschungen nach einem an der Eichelspitze gelegenen Sinnesorgan, wo bei der Larve ein Augenpaar vorhanden ist, haben zu keinem Resultat geführt.

2h) Blutgefäßsystem; Glomeruli. Die oben gegebene Darstellung des Blutgefäßsystems sei durch Erwähnung einiger Längsstämme ergänzt, die sich außer dem Rücken- und Bauchgefäßstamm finden. Solche sind namentlich im Thorax in den Submedianlinien verbreitet als Gefäße, die in Beziehung zu dem Gefäßnetz in der Wand der Gonaden treten. Im Bereiche des Postbranchialdarmes gehen sie auf diesen über und sind vielfach noch als zwei Stämme durch die Leberregion (s. Fig. 6, vl) hindurch nahe der Darmwand zu verfolgen. Einzelheiten können hier nicht wohl besprochen werden.

Zum Gefäßsystem muß auch noch der Glomerulus der Eichel gezählt werden. Er besteht, wie erwähnt, aus reich entwickelten, netzartig untereinander verbundenen, blutführenden Falten der Grenzmembran zwischen dem Eichelcölom und dem Eicheldarm bezw. der Herzblase, deren Vorderfläche mehr oder weniger von dem als Ganzes ungefähr hufeisenförmig gestalteten Glomerulus bedeckt wird. In den Netzmaschen liegen locker angeordnete Zellen, an den Kanten, unter denen die Gefäßspalten erweitert zu sein pflegen, ein höheres, oftmals zylindrisches Epithel. Die Glomerulusgefäße stehen einerseits in Verbindung mit dem zentralen Blutraum, andererseits geht von ihnen jederseits ein starkes Gefäß aus, das sich in den oben erwähnten Gefäßbogen fortsetzt, der zum Bauchgefäßstamm führt. Die Folge dieser Anordnung ist, daß jedenfalls der größte Teil des Blutes, der durch den dorsalen Gefäßstamm zugeführt wird, die Blutbahnen des Glomerulus passieren muß, ehe es wieder zum Rumpfe zurückkehrt, eine Tatsache, die für die Auffassung der Funktion des Glomerulus von Bedeutung ist.

2i) Exkretionsorgane. Die Entscheidung darüber hängt mit der Beantwortung der Frage nach der Existenz von Exkretionsorganen zusammen. Als Nephridien hat man geglaubt die Eichel- und Kragenpforten ansehen zu können, die ja als röhrenförmige mit dem Cölom in Verbindung stehende Organe eine gewisse Aehnlichkeit mit Metanephridien besitzen. Dabei übersieht man allerdings, daß gerade der größte und mit mächtig entwickelten vegetativen Organen ausgestattete Abschnitt des Körpers, der Rumpf, in dem man zunächst Nephridien erwarten sollte, obwohl seine Cölome von denen der Eichel und des Kragens vollständig getrennt sind, sicher solcher entbehrt. Ferner fehlt es den Pforten, und zwar der Eichelpforte gänzlich und den Kragenpforten in hohem Maße, an der Ausstattung mit Blutgefäßen, wie man sie bei dem Mangel eines typischen exkretorischen Epithels in diesen Kanälen wohl zu erwarten berechtigt sein würde. Daß Solenocyten, wie an den Nephridien vieler Polychäten, nicht vorhanden sind, darf um so mehr als Tatsache gelten, als Versuche, sie an diesen Stellen aufzufinden, nichts Derartiges zutage gefördert haben. Machen diese Erwägungen die nephridiale Natur der Pforten wenig wahrscheinlich, so werden wir durch das oben in bezug auf die Einschaltung des Glomerulus in das Blutgefäßsystem Bemerkte zu der Vermutung geführt, daß eben in diesem eine Absonderung von Harnstoffen aus dem von allen Körperteilen zusammenströmenden Blut stattfinden könnte, und diese Annahme wird dadurch gestützt, daß man in den den Glomerulus bedeckenden Epithelien Vacuolen und farbige Einschlüsse antrifft, die wohl kaum anders denn als dort abgeschiedene Exkrete gedeutet werden können. Und wenn wir berechtigt sind, den Glomerulus in diesem Sinne aufzufassen, so dürfte auch die besondere Beschaffenheit der den Kragen durchziehenden Gefäßbogen, die nämlich stets eine mehr oder weniger reiche Netz- oder Plexusbildung aufweisen — wozu noch die Bildung dichter Gefäßnetze unter dem Darm- wie unter dem Hautepithel des Kragens kommen —, auf eine gleiche Bedeutung dieser Teile schließen lassen. Mithin werden wir wohl annehmen müssen, daß die Exkretstoffe aus den genannten Gefäßnetzen in die Cölomflüssigkeit von Eichel und Kragen gelangen bezw. in das zum Zwecke der Schwellung in diese aufgenommene Wasser und bei dessen Entleerung nach außen abgeführt werden. Danach also würden die Pforten, die eben nur den Cölomen der beiden vorderen Körperabschnitte zukommen, zwar eine gewisse Rolle bei der Exkretion spielen, aber nicht selbst als Exkretionsorgane oder Nephridien, sondern nur neben ihrer primären Auf-

Digitized by Google

gabe der Wassereinführung zu lokomotorischen Zwecken sozusagen als Harnleiter fungieren.

2k) Geschlechtsorgane. Endlich bedürfen noch die Gonaden einer eingehenden Schilderung. Die männlichen und die weiblichen Gonaden sind nur an ihren Produkten zu unterscheiden, durch die manchmal schon an dem lebenden Tiere eine verschiedene Farbe bedingt wird, aber wesent-

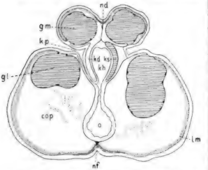


Fig. 10. Querschnitt der Kiemenregion von Harrimania kupfferi (v. W.-S.). cöp Rumpfcölom; gl laterale, gm mediale Gonade; kd Kiemenzunge; kh Kiemendarm; kp Kiemenporus; ks Kiemenseptum; nd Rücken-, nv Bauch-Nervenstamm; ö Oesophagus. Aus Spengel.

lich gleichartig gebaut und ganz gleich angeordnet. Ovarien und Hoden sind einfache oder verästelte Säcke, deren dicke Wandungen von den Eiern und Spermien und deren Bildungszellen eingenommen werden, während im Innern ein enges Lumen bleibt, das in den des kurzen Ausführungsganges übergeht.

Bei den meisten Enteropneusten bilden die Gonaden eine lange, lateral von den Kiementaschen gelegene und sich weiter in die Genitalregion fortsetzende Reihe, während bei manchen (Fig. 10) außerdem Gonaden in der Kiemenregion noch medial von den Kiemenporen vorhanden sind. Ferner können außer den in der Submedianlinie ausmündenden noch lateral davon gelegene vorhanden sein mit eigenen sekundären Genitalporen. Endlich sind in gewissen Fällen die einzelnen Gonaden mit mehreren Ausführungsöffnungen versehen, indem zu denen in der Submedianlinie noch akzessorische Genitalporen kommen. Bei den mit einem Lateralseptum ausgestatteten Ptychoderiden findet in dessen Bereiche immer eine Verästelung der Gonaden derartig statt, daß ein Ast in die Haupt-, der andere in die Dorsalkammer des Cöloms zu liegen kommt, während das Septum zwischen ihnen entspringt (Fig. 8).

3. **Ontogenie.** Beobachtungen über die Ontogenie liegen bis jetzt nur für wenige Enteropneusten vor, nämlich für 2 Dolichoglossus-(Saccoglossus-)Arten (Bateson und Davis) und von Balanoglossus clavigerus (Heider), von denen erstere relativ große, letzterer sehr kleine Eizellen besitzt. Dementsprechend entwickelt sich aus letzteren die als Tornaria bekannte pelagische, durch den Besitz einer kompliziert angeordneten Wimperschnur an Echinodermenlarven erinnernde Larve (Fig. 11), während aus ersteren eine Larvenform von nur kurz dauernder schwimmender Lebensweise ohne solche Wimperschnur hervorgeht. Beide Larvenformen sind aber mit einem präanalen Ringe von starken Wimperhaaren und an ihrem Scheitelpole mit einem Schopf langer Wimperhaare ausgestattet. Die Embryonalentwickelung verläuft insofern übereinstimmend, als durch totale, wesentlich äquale Furchung eine Blastula entsteht und aus dieser eine Gastrula hervorgeht, deren Blastoporus zum After wird. Noch ehe der Vorderdarm als eine in der ventralen Medianlinie mittels des Mundes durch-

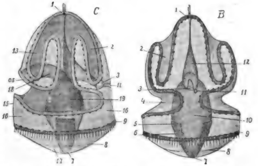


Fig. 11. Tornaria vom Rücken (B) und von der Seite (C). 1 Scheitelplatte; 3 Herzblase; 5 Kragencölom; 6 Rumpfcölom; 7 After; 9 präannaler Wimperring; 11 Eichelporus; 12 Eichelcölom; 18 Oesophagus; 19 Magen. Die übrigen Zahlen bezeichnen Wimperschnurteile und die durch sie begrenzten Felder der Oberfläche. Aus Lang.

brechende Aussackung gebildet ist, sondern sich die am Grunde der Archenteroneinstülpung gelegenen Zellen als eine gegen den Scheitel gerichtete Aussackung ab, nehmen unregelmäßige Gestalt an und formieren einen Sack, der sich einerseits an den Scheitelektoblast, andererseits mit einem dorsalwärts gekehrten Fortsatz nahe der dorsalen Medianlinie an den Ektoblast anlegt und dort einen Porus gewinnt, dagegen vom Archenteron sich abtrennt: so ist das Eichelcölom mit seinem Porus gebildet. Inzwischen sondert sich der Archenteronsack in einen scheitelwärts gewandten mehr oder weniger kugelförmigen Mitteldarm und einen bis zum After reichenden Enddarm. Damit ist das wiederholt pelagisch angetroffene jüngste Tornariastadium erreicht, in dem im Ektoblast die Differenzierung der Wimperschnurzellen von den übrigen sich vollzogen hat. Ueber die Entstehung des mittleren und hinteren Cölompaares gehen die Angaben noch erheblich auseinander. Heider sah die Bildung von einem Cölompaare in Gestalt von zwei kleinen Aussackungen aus dem Enddarm, was auch mit Spengels Beobachtungen übereinstimmt, der dann aus diesem Paare sich ein vorderes Paar von Bläschen als Anlagen der Kragencölome abgliedern läßt, während nach Bateson beide Paare sich unabhängig voneinander aus der Urdarmwand ausstülpen, nach Davis aber beide Fortsetzungen der nach hinten gerichteten Ränder des Eichelcöloms sein sollen. Bei einer Tornaria von den Bahamas endlich sollen beide Paare durch Zusammentreten von Mesenchymzellen, also ohne Beteiligung des Endoblastes, entstehen (Morgan). Daß wirklich so verschiedene Bildungsweisen vorkommen sollten, erscheint wenig wahrscheinlich.

Tornarien sind in einer erheblichen Anzahl von Formen bekannt, die hauptsächlich nach Verschiedenheiten in der Anordnung der Wimperschnüre unterschieden werden. Von keiner aber hat bisher die Artzugehörigkeit nachgewiesen werden können. Nur soviel ist wahrscheinlich, daß wenigstens die meisten Larven von Ptychoderiden sein werden. Harrimania mit ihren gewaltigen Eizellen wird unzweifelhaft eine Form sein, deren Entwickelungsweise noch mehr vereinfacht sein dürfte als die von Dolichoglossus (Saccoglossus) und vielleicht nicht einmal ein freischwimmendes Larvenstadium liefert.

Aus der Organogenese seien folgende Punkte hervorgehoben. Bei ganz wenigen Tornariaexemplaren kam bisher die Bildung des Eicheldarmes zur Beobachtung, der als ein nahe der Mundöffnung ausmündendes Epithelsäckchen vorhanden war (Morgan), von dem es aber fraglich geblieben ist, welchem Keimblatte es entstammt. Die Kiementaschen entstehen als paarige Aussackungen des endoblastischen Vorderdarmes, und zwar tritt bei den meisten Tornarien kurz vor der Metamorphose nur ein Paar auf, bei anderen schon 2 bis 3 Paare dahinter, die bei den übrigen später entstehen. Es sind anfangs zylindrische Säcke, die bald einen äußeren Porus erhalten und kurz darauf eine Zunge. Im Laufe des Wachstums findet in wesentlich der gleichen Weise eine beständige Neubildung von Kiementaschen hinter den vorhandenen statt. Die Nervenstränge bilden sich kurz vor der Metamorphose als Differenzierungen des Ektoblastes. Mit dieser ist eine Versenkung des auf den Kragen fallenden Teiles des dorsalen Nervenstammes in die Tiefe verbunden, die sich entweder in der Form einer Abspaltung oder einer Rinnenbildung vollzieht: so sondert sich das Kragenmark von dem übrigen dorsalen Nervenstrang. Ueber die Anlage der Herzblase gehen die Ansichten auseinander: nach Spengel entsteht diese als eine kleine Wucherung des Ektoblastes zur rechten Seite des Eichelporus, nach Morgan durch Zusammentreten von Mesenchymzellen an dieser Stelle. Bei der Tornaria führt die Blase schon von einer geringen Größe an regelmäßige herzartige Pulsationen aus, weshalb sie als Herz beschrieben worden ist. Wie der eigentümliche Komplex der Organe am Eichelgrunde (der Eicheldarm ventral, nur durch den zentralen Blutraum von der Herzblase getrennt, die weit entfernt von jenem an der dorsalen Seite entstanden ist) zustande kommt, ist noch nicht aufgeklärt: mit der Metamorphose muß jedenfalls eine gegenseitige Verschiebung dieser Organe erfolgen, durch die jener Komplex in eine tiefe Nische des Eichelcöloms zu liegen kommt und nun von dessen Hinterwand bekleidet wird, ferner eine Verlagerung des Oesophagus der Tornaria nach hinten, so daß die Kiementaschen hinter den Kragencölomen die Haut im vorderen Teile der von den Rumpfcölomen eingenommenen Region durchbrechen.

Die Metamorphose der frei umherschwimmenden Tornaria in das am Boden kriechende Tier geht im Laufe weniger Stunden vonstatten und ist mit einer auffallenden Verkleinerung verbunden, die in erster Linie durch den vollständigen Schwund der das Blastocöl erfüllenden nahezu wässerigen Gallerte bedingt ist. Damit geht nicht nur eine gänzliche Auflösung der Wimperschnur sowohl als auch des präanalen Wimperringes Hand in Hand, sondern auch ein Zerfall bestimmter Gebiete des Hautepithels der Tornaria, während die

Digitized by Google

erhaltenen Teile sich zusammenschließen und gleichzeitig zu einem Zylinderepithel werden, in dem zahlreiche Drüsenzellen auftreten. Auch die zwei Augenflecke, die bei allen Tornarien auf einer Scheitelverdickung angebracht sind, gehen bald ganz zugrunde. Indem die Mundöffnung sich vertieft, grenzt sich die davor gelegene Partie des Larvenkörpers als Eichel ab, während die Sonderung des Kragens von dem anfangs noch kurzen Rumpf zunächst wenig deutlich ist, mit der Streckung des letzteren aber zunimmt. Sehr bald beginnt das wurmförmig gewordene Tierchen sich in den Boden einzugraben.

4. **Biologie.** Ueber die Biologie der Enteropneusten ist wenig bekannt. Für Balanoglossus clavigerus ist nach Beobachtungen an der Küste der Adria (Stiasny 1910) festgestellt, daß seine in den Sand des Meeres gegrabenen Gänge, die sich bis zu $^1/_2$ bis $^3/_4$ m Tiefe erstrecken, durch 2 Oeffnungen mit der Oberfläche in Verbindung stehen. Durch die eine derselben wird der Sand, der den Darm passiert hat, in charakteristisch gestalteten Knäueln ausgestoßen, während dem anderen das Kopfende zugewandt ist. Wie andere Sandfresser dürften die Enteropneusten aus den organischen Beimengungen des Quarz- oder Kalksandes, mit dem sie ihren Darmkanal anfüllen, ihre Nahrung ziehen. — Einem Verständnis entzieht sich bis jetzt die Beobachtung, daß gewisse Glandiceps-Arten zu Zeiten in gewaltigen Schwärmen im Oberflächenwasser schwimmend angetroffen werden, Ikeda 1908, nahe der Küste von Japan, angeblich regelmäßig in warmen Sommernächten, August und September; eine andere Art bei Surabaja, Java (April bis Juni). — Für Balanoglossus clavigerus ist beobachtet, daß die Eier zu Hunderten in schleimigen Laichklumpen von etwa Nußgröße an einem Ende der Wohnröhre abgelegt werden. Einige Harrimania-Arten erzeugen sehr große Eier, die in noch höherem Grade „abgekürzte" Entwickelung haben dürften als die Dolichoglossus-Arten, deren Ontogenie verfolgt ist (s. oben).

Für mehrere Ptychoderiden-Arten ist eine ausgedehnte Regenerationsfähigkeit nachgewiesen worden, dank der Eichel, Kragen und Kiemenregion ersetzt werden können.

5. **Systematik und Phylogenie.** Die bisher bekannten Enteropneusten können in folgende 3 Familien eingeteilt werden, deren Hauptmerkmale angegeben sind.

I. Ptychoderidae.
Eicheldarm ohne Wurmfortsatz.
Eichelskelettschenkel bis zur Mitte des Kragens reichend.
Kragenwurzeln vorhanden.
Rumpf: Synaptikel vorhanden.
Aeußere Ringmuskulatur meistens vorhanden.
Lateralsepten vorhanden.
Genitalpleuren vorhanden.
Lebersäckchen meistens vorhanden.
Keine Darmpforten vorhanden.
Dahin die Gattungen Ptychodera Eschsch., Balanoglossus D. Ch. und Glossobalanus Spgl.

II. Spengeliidae Willey (Glandicipitidae Spgl.).
Eicheldarm mit Wurmfortsatz.
Eichelskelettschenkel bis ans Hinterende des Kragens reichend.
Keine Kragenwurzeln vorhanden.
Rumpf: Synaptikel vorhanden (Schizocardium, Spengelia) oder fehlend (Glandiceps).
Ringmuskulatur nach innen von der Längsmuskulatur.
Keine Lateralsepten vorhanden.
Keine Genitalpleuren vorhanden.
Lebersäckchen vorhanden (Schizocardium, Spengelia) oder fehlend (Glandiceps).
Darmpforten vorhanden (paarige und unpaarige: Schizocardium, Glandiceps; nur unpaarige: Spengelia).
Dahin die Gattungen Schizocardium Spgl., Spengelia Willey und Glandiceps Spgl. (Die Zugehörigkeit von Willeya Punn. ist zweifelhaft.)

III. Harrimaniidae Spgl. (vorläufig!).
Eicheldarm ohne Wurmfortsatz.
Eichelskelettschenkel bis ans Hinterende des Kragens reichend.
Keine Kragenwurzeln vorhanden.
Rumpf: Synaptikel nicht vorhanden.
Ringmuskulatur nicht vorhanden.
Keine Lateralsepten vorhanden.
Keine Genitalpleuren vorhanden.
Keine Lebersäckchen vorhanden.
Darmpforten vorhanden oder fehlend. (nur unpaarige: Dolichoglossus), (Harrimania, Protobalanus?, Stereobalanus?).
Dahin die Gattungen Harrimania Ritter, Protobalanus Caull. et Mesn., Dolichoglossus Spgl. (Saccoglossus Schimk.) und Stereobalanus Spgl.

Das meiste scheint dafür zu sprechen, daß die einfachsten Harrimaniidae und unter ihnen wieder Protobalanus die primitivsten, dagegen die Ptychoderidae die höchststehenden Formen sind. Die Entscheidung darüber ist von großer Bedeutung für gewisse phylogenetische Fragen. Es besteht nämlich eine auffallende Aehnlichkeit zwischen den Kiemen (Kiemenbogen, Kiemenzungen, 3zinkige Skelettgabeln, Synaptikel) von Enteropneusten und denen des Amphi-

Digitized by Google

oxus, die von mancher Seite geradezu als ein Beweis für die Verwandtschaft jener mit den Chordaten angesehen wird, obwohl mancherlei auch dafür spricht, daß die Aehnlichkeit auf Konvergenz beruht. Im Zusammenhang damit wird der Eicheldarm der Enteropneusten als eine auf den Kopf beschränkte Chorda dorsalis (Notochord) gedeutet (Hemichordata). Für die Annahme, daß der von den Kiemen nicht umfaßte ventrale Teil des Darmkanals der Kiemenregion dem Endostyl (Thyreoidea) der Chordaten entspreche, fehlt jede Stütze. Die Deutung des Kragenmarks und des dorsalen Nervenstammes als Gehirn und Rückenmark stößt auf die Schwierigkeit, daß daneben ein durch einen Nervenring mit dem Kragenmark verbundener Bauchnervenstamm vorhanden ist. Auf andere Organe kann der Vergleich überhaupt nicht ausgedehnt werden. Andererseits stützt sich die Annahme einer Verwandtschaft mit Echinodermen auf eine durch die Anordnung der Wimperschnur bedingte Aehnlichkeit der Tornaria mit Echinodermenlarven, denen jedoch der präanale Wimperring fehlt, und auf die Entstehung der Cölome aus dem Archenteron. Indem man glaubt, sowohl den Enteropneusten als auch den Echinodermen 3 Paare von Cölomen zuerkennen zu müssen, ist man zur Annahme einer trimeren Stammform gekommen, an die sich auch andere Tiere anschließen sollen, und hat so versucht, Verwandtschaftsbeziehungen zu diesen zu verfolgen. Wenn endlich eine gewisse Uebereinstimmung der Tornaria mit der Trochophora sich als nicht bedeutungslos herausstellen sollte, so werden Beziehungen zu den Anneliden und anderen Trochozoen angenommen werden können. Einstweilen bleibt die Phylogenie der Enteropneusten sehr unsicher.

Literatur. *Anatomie:* ***Spengel****, Die Enteropneusten, in: Fauna und Flora des Golfs von Neapel, Monographie* 18, *1893.* — ***Willey****, Enteropneusta from the South Pacific, in: Willeys Zoological Results, Cambridge 1899.* — *Ontogenie:* **Bateson**, *in: Quart. Journ. microsc. Soc., Vol.* 24, 25, 26, *1884 bis 1886.* — ***Davis****, in: Univ. California Publ. Zool., Vol.* 4, *1908. (Dolichoglossus).* — ***Heider****, in: Zool. Anz., Vol.* 34, *1909. (Balanoglossus). Metamorphose der Tornaria:* ***Spengel*** *1893.* — ***Morgan****, in: Journ. Morphol., Vol.* 5 *und* 9, *1891 und 1894.* — *Systematik:* ***Spengel*** *1893 und in: Zoologisches Jahrbuch, Vol.* 15, *Systematik, 1901.*

J. W. Spengel.

Entwickelungsmechanik oder Entwickelungsphysiologie der Tiere und der Pflanzen.

A. Entwickelungsmechanik oder Entwickelungsphysiologie der Tiere.

I. Gebietsbegrenzung und Aufgabe der Entwickelungsmechanik oder Entwickelungsphysiologie. II. Die Geschichte der Entwickelungsmechanik oder Entwickelungsphysiologie. III. Das Determinationsproblem oder die Frage nach der Verteilung der Entwickelungspotenzen im Embryo. A. Deskriptiver Teil. 1. Die Beziehung zwischen Medianebene und erster Furche. 2. Sind die Hauptrichtungen des Embryos schon am unbefruchteten Ei zu erkennen? 3. Die Bestimmung der Medianebene durch die Eintrittsstelle des Spermatozoons. 4. Die Mosaikfurchung tierischer Eier. 5. Sind die Orte der Keimblätter- und Organbildung schon am ungefurchten Ei zu erkennen? 6. Die Bedeutung der Reifung für die Verteilung der organbildenden Eibezirke. 7. Das Prinzip der organbildenden Keimbezirke (His) und die Begriffe: prospektive Bedeutung und prospektive Potenz (Driesch). B. Experimenteller Teil. B_1. Die Trennung der Blastomeren und ihre Folgen. 1. Ueber die künstliche Hervorrufung halber Embryonen nach Zerstörung einer der beiden ersten Furchungskugeln, sowie über die Nachentwickelung (Postgeneration) der fehlenden Körperhälfte. 2. Die Versuche an Echinodermen. 3. Experimente an anderen Formen mit gleichem Ergebnis wie bei den Echinodermen. 4. Experimente mit ähnlichem Ergebnis wie am Froschei. 5. Versöhnung der scheinbar einander widersprechenden Tatsachen. B_2. Die Potenzen der Organzellen. 1. Die Versuche von Driesch an Echinodermenlarven. 2. Der Gültigkeitsbereich der ermittelten Tatsachen. B_3. Die Widerlegung der Hypothese der qualitativ ungleichen Kernteilung als Ursache der Beschränkung der Potenzen. 1. Die Roux-Weismannsche Hypothese von der qualitativ ungleichen Kernteilung. 2. Die Widerlegung der Möglichkeit, daß qualitativ ungleiche Kernteilung die erste Ursache der Differenzierung ist, durch den Nachweis der Gleichgültigkeit des Furchungsmodus für den Entwickelungsablauf. 3. Die Widerlegung derselben Möglichkeit durch die Druckversuche von Driesch. 4. Plasmaverschiedenheiten als Ursachen von Differenzierungen und von Beschränkung der Potenzen. B_4. Das Verschmelzen von 2 Ganzkeimen zu einem einheitlichen Großkeim. 1. Das Verschmelzen von Eiern. 2. Die Verschmelzung von Keimen auf frühen Entwickelungsstadien. B_5. Präformation und Epigenese. B_6. Das harmonisch-äquipotentielle System und die Autonomie der Lebensvorgänge. 1. Der Echinidenurdarm als harmonisch-äquipotentielles System und die Definition des letzteren. 2. Aufzählung anderer harmonisch-äquipotentieller Systeme. 3. Nähere Analyse des Geschehens an harmonisch-äquipotentiellen Systemen. 4. Drieschs erster Beweis der Autonomie der Lebensvorgänge. 5. Drieschs zweiter Beweis der Autonomie der Lebensvorgänge aus der Existenz von äquipotentiellen Systemen mit komplexen Po-

Digitized by Google

tenzen. 6. Die Kritik des Drieschschen Standpunktes. IV. Die äußeren Faktoren der tierischen Entwickelung. A. Die notwendigen äußeren Faktoren. 1. Der Einfluß der Schwerkraft. 2. Der Einfluß des Kontaktes. 3. Der Einfluß des Lichtes. 4. Der Einfluß der Temperatur. 5. Der Einfluß der Wasserzufuhr. 6. Der Einfluß von Sauerstoff. 7. Die zur Entwickelung notwendigen anorganischen Stoffe. B. Anregende äußere Faktoren. C. Abändernde äußere Faktoren. 1. Der Zweck der Abänderung des Entwickelungsverlaufs durch abnorme äußere Faktoren. 2. Der Einfluß der Zentrifugalkraft auf die Teilung und Entwickelung tierischer Eier. 3. Der Einfluß abnormer anorganischer Stoffkombinationen. 4. Der Einfluß der Konzentration des umgebenden Mediums auf die Ausgestaltung von Artemia. 5. Kurzer Hinweis auf die für die Formenumwandlungs- und Vererbungslehre bedeutungsvollen Abänderungen. V. Die inneren Faktoren der tierischen Entwickelung. A. Die in der Eiorganisation gegebenen lokalisierenden Differenzierungsfaktoren. B. Die Bedeutung der Richtungsreize für die Lokalisation von Bildungsprozessen. 1. Das Problem. 2. Experimentell in Angriff genommene Fälle. C. Gestaltliche Beeinflussung der Organe und Organteile untereinander. 1. Terminologisches. 2. Formative Reize, welche den Ort der Organanlage bestimmen. 3. Formative Reize, welche die Qualität der Organanlage bestimmen. 4. Formative Reize, welche Ort und Qualität der Organanlage bestimmen. 5. Die Beeinflussung der Regenerationsprozesse durch das Nervensystem. D. Funktionelle Anpassung und Ontogenese. 1. Aufzählung einiger funktioneller Strukturen. 2. Die Rouxsche Erklärung der Entstehung funktioneller Strukturen. 3. Ist die Rouxsche kausale Ableitung der Entstehung der funktionellen Strukturen imstande, die Ausbildung der letzteren während der Ontogenese zu erklären? 4. Zwei andere Erklärungsweisen für gewisse Arten von funktionellen Strukturen. 5. Einige andere Fälle der Beeinflussung der Gestaltung durch die Inanspruchnahme. E. Die Theorie der formativen Reize und das Problem der anfänglichen Selbstdifferenzierung der Organe und ihrer späteren Abhängigkeit von anderen. 1. Auseinandersetzung der Theorie. 2. Die Kritik der Theorie der formativen Reize. 3. Aufzählung einiger Fälle von Selbstdifferenzierung. 4. Versuche einer einheitlichen Auffassung des ganzen Tatsachenmaterials. F. Die inneren Komponenten der Organbildungen. 1. Die physiologischen Komponenten. 2. Die physikalischen Komponenten.

I. Gebietsbegrenzung und Aufgabe der Entwickelungsmechanik oder Entwickelungsphysiologie.

In den letzten 20 bis 30 Jahren hat sich in der zoologischen Forschung ein Umschwung vollzogen, der weit tiefgreifender ist, als der, welcher durch das Erscheinen der Darwinschen Werke hervorgerufen worden ist. Vor und nach Darwin blieb nämlich merkwürdigerweise — merkwürdigerweise deshalb, weil die Schriften Darwins auch in anderer Richtung hätten anregend wirken können — die Forschungsweise ganz dieselbe. Man beschrieb die verschiedenen tierischen Formen, verglich sie untereinander und ordnete sie nach dem Grade ihrer größeren oder geringeren Aehnlichkeit in ein System, das den größeren oder geringeren Verwandtschaftsgrad der einzelnen Tierformen wiedergeben sollte. Nur die Auslegung der durch einfache Beschreibung und Vergleichung gefundenen Tatsachen wurde nach Darwin eine andere, und nur durch sie unterscheidet sich ein Cuvier von einem Gegenbaur. Von den achtziger Jahren des verflossenen Jahrhunderts an wurde aber die Forschungsweise in der Morphologie der Tiere allmählich eine andere, was sich rein äußerlich durch das Einführen des Experimentes in die morphologische Methodik zu erkennen gibt. Allein das Experiment erhebt eine Wissenschaft einer rein beschreibenden gegenüber noch auf keine andere Stufe, denn auch ein Experiment kann, wie sich Roux ausdrückt, noch rein „beschreibend" sein. Beispiele für solche rein beschreibenden Experimente liefern z. B. jene Untersuchungen von Harrison und Braus, die sich auf die Herkunft der Seitenlinie bei Kaulquappen, auf die Herkunft der Schwannschen Scheidezellen und auf das Auswachsen der Nervenfasern beziehen, und bei denen die Transplantationsmethode resp. der operative Eingriff angewendet wurde. Auch das physiologische Experiment ist in jenen Fällen rein beschreibend, wo es weiter nichts als die Funktion eines Organes ermitteln soll. Die experimentelle Physiologie steht also trotz des Experimentes zum großen Teil auf keiner anderen Stufe als die einfache beschreibende Morphologie. Will sie mehr bedeuten, so darf sie nicht bei der Feststellung der Funktion der verschiedenen Organe stehen bleiben, sondern muß sie die einzelnen Faktoren, von denen der normale Ablauf der Funktion abhängig ist, zu eruieren und die Gesetze des Wirkens dieser Faktoren zu ermitteln suchen. Ganz entsprechend wird die experimentelle Morphologie erst dann über die reine Beschreibung emporgehoben, wenn sie sich identisch mit der modernen kausalanalytischen Behandlung morphologischer Probleme erklärt, wie sie zuerst in bewußter Weise von Wilhelm Roux auf die ontogenetische Entwickelung der Tiere angewandt worden ist. Derselbe führte für diese neue morphologische Kausal- und Gesetzeswissenschaft den Namen „Entwickelungsmechanik" ein. Um den Unterschied zwischen deskriptiver und kausal-analytischer Forschung noch einmal recht klar zu machen und die Ziele der Entwickelungsmechanik deutlich hervortreten

Digitized by Google

zu lassen, mag im Anschluß an Roux (Vorträge und Aufsätze über die Entwickelungsmechanik der Organismen, Heft I, S. 23, 1905) der Fall einer Bleikugel und einer Vogelfeder nach der einfachen beschreibenden und nach der kausalanalytischen Methode betrachtet werden. Läßt man gleichzeitig aus einer gewissen Höhe eine Bleikugel und eine Vogelfeder zur Erde herabfallen, so sieht man, daß die Bleikugel in gerader Richtung herabfällt und den Erdboden rascher erreicht als die Feder, welche außerdem nicht gerade, sondern im Zickzack fällt. Eine Physik, welche sich auf die Beschreibung der Vorgänge beschränken wollte, würde also sagen: eine Bleikugel fällt rascher und in einer anderen Bahn zur Erde als eine Feder. Die kausalanalytische Forschung zergliedert dagegen das Geschehen und zeigt, daß beim Fallen in der Luft zweierlei Faktoren beteiligt sind, die Schwere und der Widerstand der Luft. Denn durch das Experiment, welches den letzteren der beiden Faktoren ausschaltete, wurde gezeigt, daß im luftleeren Raum alle Körper gleich rasch und in gerader Richtung fallen.

Die rationelle Physik ist aber mit dieser kausalen Feststellung auch noch nicht zufrieden, sondern sucht weiter die Gesetze zu ermitteln, nach welchen die Naturfaktoren wirken. Durch Messung der Fallstrecken und der Fallzeiten gelangte sie so zur Kenntnis der Fallgesetze.

Ganz analog hat die Entwickelungsmechanik die Aufgabe, das Material, welches die einfache deskriptive Forschung liefert, kausalanalytisch zu zergliedern, d. h. die einzelnen Faktoren, welche bei einem morphologischen Geschehen eine Rolle spielen, aufzufinden und die Gesetze ihres Wirkens festzustellen.

Wie nun weiter die Kenntnis der anorganischen Naturfaktoren und der Gesetze ihres Wirkens die Forscher in den Stand gesetzt hat, diese Faktoren zu praktischen Zwecken zu verwerten, so wird auch die Kenntnis der Faktoren, welche an einem morphologischen Geschehen beteiligt sind, und das Wissen um die Gesetze ihres Wirkens die Menschen dahin bringen, dieses Geschehen nach ihrem Wunsche zu leiten. Die Beherrschung des organischen Gestaltungsgeschehens ist also das Endziel der Entwickelungsmechanik der Organismen.

Aber nicht nur auf die ontogenetische Entstehung der Formen, sondern auch auf die postembryonale Erhaltung derselben, hat sich die kausalanalytische Betrachtungsweise zu erstrecken. Auch dieses Gebiet kann man noch zur Entwickelungsmechanik rechnen, wenn man das Wort „Entwickelung" ganz weit faßt und es nicht nur auf das embryonale, sondern auch auf das ganze postembryonale Leben bis zum Tode anwendet.

Die moderne kausalanalytische Morphologie unterscheidet sich also von der deskriptiven Zoologie nicht nur durch die Verwendung des Experimentes, sondern vor allem durch die Fragestellung.

Obwohl nach dem vorigen das Experiment nicht das einzige Charakteristikum der modernen rationellen Morphologie ist, so ist es trotzdem für eine kausalanalytische Betrachtungsweise der Formen unentbehrlich. Denn mag die deskriptive Forschung noch so oft beobachtet haben, daß ein bestimmtes Organ im normalen Verlaufe der Entwickelung immer aus einem bestimmten Eibezirk mit bestimmten Plasmaeinschlüssen hervorgeht, so ist damit doch noch kein notwendiger Kausalzusammenhang zwischen der Organbildung und den sichtbaren Plasmadifferenzierungen ermittelt, und ebensowenig darf man von der Aufdeckung eines Kausalzusammenhanges sprechen, wenn die Beschreibung immer das Aufeinanderfolgen eines Bildungsprozesses auf einen bestimmten anderen feststellt, also z. B. konstatiert, daß sich die Linse immer erst dann bildet, wenn sich die primäre Augenblase ans Ektoderm angelagert hat. Deskription ist nicht imstande das Post hoc von dem Propter hoc zu unterscheiden, sie kann ohne experimentellen Eingriff nicht die zu einem Geschehen notwendigen Faktoren, geschweige die Gesetze ermitteln, nach denen die letzteren wirksam sind. Nur Regeln des Geschehens kann sie feststellen, wie Roux richtig bemerkt.

So klar und deutlich nun aber auch die Aufgabe und das Endziel der neuen biologischen Disziplin feststeht, so wenig einig ist man sich über den Namen, welchen man der neuen Wissenschaft geben soll. Der Name Entwickelungsmechanik, welchen sie von ihrem Begründer erhalten hat, hat sich nämlich keiner allgemeinen Anerkennung zu erfreuen, wohl deshalb, weil man bei dem Worte „Mechanik" vermuten könnte, es solle Aufgabe der neuen Forschungsrichtung sein, das organische Entwickelungsgeschehen ganz in Mechanik aufzulösen, was zum mindesten eine dogmatische Voreingenommenheit bedeuten würde. Roux hat aber diesem Vorwurf jeden Grund und Boden durch den Hinweis entzogen, daß er bei Bildung des Taufnamens seiner neuen Wissenschaft das Wort Mechanik gar nicht in dem engen Sinne der Physik, sondern in jenem weiten gebraucht habe, den auch Kant damit verbindet, und der zur Mechanik ein jedes der Kausalität unterstehendes Geschehen rechnet.

Diese Verteidigung Rouxs hat aber trotzdem die Einbürgerung neuer Namen nicht verhindern können. Von diesen ist

Digitized by Google

die Bezeichnung Entwickelungsphysiologie am verbreitetsten. Sie kommt zuerst bei Gustav Wolff vor und wurde von Driesch mit Vorliebe angewandt, während Jacques Loeb seine Bestrebungen als physiologische Morphologie bezeichnete, obwohl dieselben in ihren Zielen und Wegen ganz mit Rouxs Forschungsrichtung identisch sind. Auch die indifferenten Namen: experimentelle Entwickelungsgeschichte, experimentelle Morphologie, experimentelle Zoologie sind vielfach für das gleiche Forschungsgebiet in Gebrauch.

II. Die Geschichte der Entwickelungsmechanik oder Entwickelungsphysiologie.

Die Anfänge der experimentellen Morphologie reichen in das 18. Jahrhundert zurück und knüpfen sich vornehmlich an die Namen: Trembley, Réaumur, Bonnet und Spallanzani. Aber so wichtig und zahlreich auch die Resultate waren, welche diese vier Forscher über das Formenregulationsvermögen vieler Tiere zutage gefördert haben, kann man sie doch nicht als die Begründer der Entwickelungsmechanik in dem oben definierten Sinne bezeichnen. Auch His, Goette und Rauber sind nur als Vorläufer und, im Gegensatz zu den Forschern des 18. Jahrhunderts, sogar nur in theoretischer Hinsicht zu bezeichnen. Das Verdienst, die Entwickelungsmechanik nicht nur theoretisch begründet, sondern auch durch planvolle Experimente zuerst in Angriff genommen zu haben, gebührt vielmehr Wilhelm Roux, dessen „Beiträge zur Entwickelungsmechanik des Embryo" (1884 bis 1888) Marksteine in der biologischen Wissenschaft bedeuten. An Roux schloß sich mit seinen „entwickelungsmechanischen Studien" 1891 Hans Driesch an, ging aber bald auf ganz selbständigen Wegen weiter. Durch Driesch wurden zuerst E. B. Wilson und dann T. H. Morgan während ihres Aufenthaltes an der zoologischen Station zu Neapel der neuen Forschungsrichtung zugeführt. So gelangte die Entwickelungsmechanik nach Amerika, wo aber außerdem noch ein anderer, ganz selbständiger Forscher seine Samenkörner auszustreuen begann, Jacques Loeb. Derselbe kam von Julius Sachs her, dessen großer Einfluß auf Loeb in den „Untersuchungen zur physiologischen Morphologie der Tiere" (Würzburg 1891 und 1892) deutlich zu erkennen ist. Die moderne, kausal-analytische Forschungsrichtung in der Morphologie hat somit zwei verschiedene Wurzeln. Die eine kommt von Roux, die andere von den großen Botanikern Sachs und Pfeffer, her, denn auch der letztere hat neben dem ersteren einen großen Einfluß auf die entwickelungsmechanischen Forscher, unter diesen namentlich auf Herbst, ausgeübt. Das erste System der Entwickelungsmechanik hat im Jahre 1899 Driesch in den „Ergebnissen der Anatomie und Entwickelungsgeschichte" und die erste lehrbuchmäßige Bearbeitung 1902 Karl Heider in dem Lehrbuch der Entwickelungsgeschichte von Korschelt und Heider geliefert.

III. Das Determinationsproblem oder die Frage nach der Verteilung der Entwickelungspotenzen im Embryo.

Wilhelm Roux begann seine entwickelungsmechanischen Untersuchungen mit der Inangriffnahme der Frage nach der Zeit der Schicksalsbestimmung der einzelnen Zellen zu bestimmten Teilen des Embryos. Es ist das eine Vorfrage, die zunächst die Auflösung des Entwickelungsgeschehens in einzelne Faktoren beiseite läßt, dagegen nach der Verteilung der Entwickelungsfähigkeiten, der Entwickelungspotenzen, in den Zellen des Embryos frägt. Auf das Zweizellenstadium des gefurchten Eies angewandt lautet die Frage: Sind die beiden Zellen in bezug auf ihre Entwickelungsfähigkeiten noch gleich, sind sie noch äquipotentiell untereinander, oder sind sie bereits zu bestimmten Teilen des Embryos determiniert, sind also ihre Entwickelungspotenzen schon beschränkter als die des ganzen Eies? Wir sehen zunächst zu, was die deskriptive Forschung uns auf diese Frage antworten kann.

A. Deskriptiver Teil.

1. Die Beziehung zwischen Medianebene und erster Furche. Wir beginnen mit dem einfachsten Fall, den auch Roux zuerst ins Auge faßte, mit der Zeit der Bestimmung der Hauptrichtungen des Froschembryos. Roux gelangte hierbei zu dem Ergebnis, daß nach Ausschluß aller störenden Nebeneinwirkungen die erste Furche des Froscheies mit der Medianebene des Embryos zusammenfällt. Zu demselben Resultate kam, unabhängig von und ungefähr gleichzeitig mit Roux, Pflüger, und schließlich stellte es sich heraus, daß drei Jahrzehnte vorher schon Newport bei seinen in Vergessenheit geratenen Untersuchungen über die Befruchtung und Entwickelung des Amphibieneies das gleiche Ergebnis erhalten hatte. Neuerdings wurde dann der Rouxsche Befund für den typischen Fall auch noch von Brachet bestätigt. Im typischen Fall fällt die erste Furche außerdem mit der Symmetrieebene des Eies zusammen d. h. sie geht nach Roux bei Rana esculenta durch den höchsten Punkt der hellen und den tiefsten der dunklen Hemisphäre des mit seiner primären Eiachse nach der Befruchtung schief stehenden Eies hindurch. Bei Rana

Digitized by Google

fusca erscheint dagegen nach der Befruchtung an der einen Seite des Eies ein graues halbmondförmiges Feld, durch dessen höchsten Punkt im typischen Falle sowohl die Symmetrieebene des Eies wie die erste Furche und die spätere Mediane des Embryos hindurchgeht. Zur Kopfseite des Embryos wird die Seite des Eies, wo die helle Rinde resp. der graue Halbmond am weitesten nach oben reicht, während die Schwanzseite der tiefsten Stelle der dunklen Rinde entspricht. Die zweite Furche trennt demnach vorn und hinten oder, präziser ausgedrückt, vorn oben und hinten unten, denn der virtuelle Embryo reicht, wie beistehende Figur 1

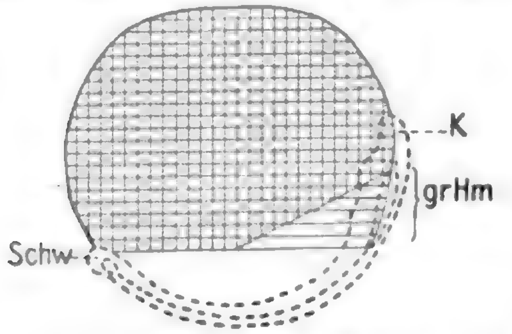


Fig. 1. Virtuelle Lage des Embryos im Ei von Rana fusca. Schematisiert. Nach Roux. K Kopfseite, Schw Schwanzseite, grHm grauer Halbmond.

zeigt, auf der Seite mit dem grauen Feld weiter nach dem oberen Teil des Eies als auf der anderen. Anders liegen dagegen die Verhältnisse, wenn störende Nebeneinflüsse auf die Stellung der Furchungsebenen einwirken, wie das z. B. der Fall ist, wenn die Froscheier mit stark geneigter Eiachse auf die Glasplatte, auf welcher die Markierung des Verlaufs der ersten Furche angebracht wird, aufgesetzt und in dieser Stellung in Zwangslage durch ungenügendes Quellenlassen der Gallerthülle gehalten werden. In solchen Fällen steht nämlich — wie Born zuerst fand und auch von Roux beobachtet wurde — die erste Furche meist senkrecht zur Medianebene, welche dann erst mit der zweiten Furche zusammenfällt. Roux spricht infolgedessen hier von einem Anachronismus der Furchung.

Bei den Tritonen ist bis jetzt das Herausschälen des typischen Falles nicht gelungen. Nach Jordan steht bei Triton cristatus die erste Furche annähernd senkrecht zur Medianebene, während Spemann bei Triton taeniatus die Medianebene des Embryos in etwa $^2/_3$ bis $^3/_4$ der Fälle mit der zweiten, in $^1/_4$ bis $^1/_3$ dagegen mit der ersten Furche zusammenfallen sah. Es ist möglich, daß auch hier das letztere Verhalten das typische ist, daß aber die Einschnürungsmethode, welche seit O. Hertwig bei den Tritonen zur Eruierung des Schicksals der Furchungszellen verwandt wird, eine Verlagerung der Symmetrieebene zur Folge hat.

Für die Ascidien haben van Beneden und Julin das Zusammenfallen der ersten Furche mit der Medianebene des Embryos bereits 1884 festgestellt.

Bei den Ctenophoren entspricht die erste Furche der Magenebene, die zweite der Tentakelebene.

Für die Echiniden hat Boveri das Zusammenfallen der ersten Furche mit der Medianebene der Larve aus der Existenz partiell-thelykaryotischer Keime abgeleitet, welche aus Eiern hervorgehen, bei denen die Kopulation von väterlichem und mütterlichem Kernanteil erst in einer Zelle des Zweizellenstadiums vor sich geht, so daß also die eine Zelle rein mütterliches, die andere dagegen mütterliches und väterliches Kernmaterial aufweist. Auch die Herbstschen Befunde an partiell-thelykaryotischen Bastardlarven sprechen hierfür. Driesch dagegen sah bei seinen Versuchen, wo die Eier schon vom ungefurchten Zustande an oder auch erst nach der ersten Teilung der Wirkung von verdünntem Seewasser ausgesetzt worden waren, die erste Furche oral von aboral trennen und erst die zweite mit der Medianebene der Larve zusammenfallen. Boveri identifiziert seine Befunde mit dem typischen Falle und meint, daß durch die Einwirkung des verdünnten Seewassers, welche in einer Trennung oder Auseinanderzerrung ohne völlige Trennung der Furchungszellen sich äußert, eine Verdrehung der Symmetrieebene stattgefunden hat.

Ist hiernach die Möglichkeit vorhanden, die Befunde an Seeigeln ebenso wie die der Tritonen noch in Uebereinstimmung mit denen bei den Fröschen zu bringen, so hat aber in anderen Fällen die erste Furche sicher nichts mit der Medianebene des Embryos zu tun. Das ist z. B. beim Ei von Ascaris megalocephala der Fall, dessen erste Furche nach Boveri der dritten äquatorialen Furche anderer Eier entspricht und eine ganz andere Bedeutung als die Scheidung des Materials für die rechte und linke Körperhälfte hat, wie wir weiter unten sehen werden.

2. Sind die Hauptrichtungen des Embryos schon am unbefruchteten Ei zu erkennen? Wir gehen einen Schritt weiter und fragen, ob man nicht sogar schon am unbefruchteten Ei die Hauptrichtungen des Embryos wahrnehmen könne?

Bei manchen Eiern ist dies in der Tat der Fall. So zeigt nach Cerfontaine bereits die Oocyte I von Amphioxus eine deutliche bilaterale Symmetrie vor dem Eintritt eines Spermatozoons. Dasselbe gilt von dem Ei der Cephalopoden, wie beistehende Abbildung (Fig. 2) lehrt. Der spitzere Eipol bezeichnet dorsal, der stumpfere ventral; die

Digitized by Google

Seite, auf welcher der Bildungsdotter weiter ventralwärts reicht, bezeichnet vorn, die entgegengesetzte hinten. Auch das unbefruchtete Insektenei läßt die Hauptrichtungen des Embryos bereits deutlich erkennen. Andere unbefruchtete Eier weisen dagegen nur eine ungleichpolige Achse auf, wie dies z. B. bei den Eiern von Strongylocentrotus lividus nach Boveri und auch beim Froschei der Fall ist. Bei dem letzteren erscheint die zweite ungleichpolige Achse,

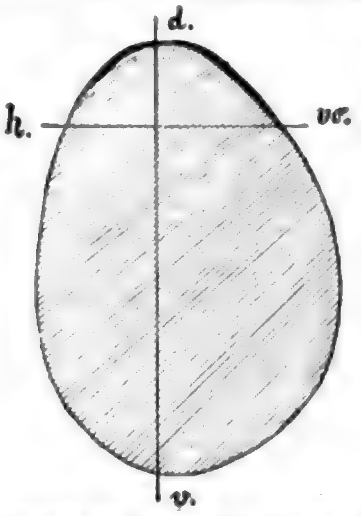


Fig. 2. Medianer Längsschnitt durch das Ei von Loligo pealii. Nach Watasé. Aus Korschelt und Heider. d dorsal, v ventral, vo vorn, h hinten.

wie wir noch näher sehen werden, nach dem Eintritt des Spermatozoons in das Ei, während beim Seeigelei auch nach der Befruchtung nichts von einer bilateralen Symmetrie zu entdecken ist. Natürlich ist damit keineswegs gesagt, daß eine solche auf dem betreffenden Stadium noch nicht vorhanden ist, ja es ist sogar möglich, daß auch die Eier, welche vor der Befruchtung nur eine ungleichpolige Achse erkennen lassen, trotzdem in ihrem intimeren Bau bereits bilateral sind. Es ist am zweckmäßigsten, wenn wir im Anschluß an diese Erwägungen einmal das rein deskriptive Gebiet verlassen und uns gleich an dieser Stelle Experimenten zuwenden, welche die Frage zu entscheiden suchten, ob bei den Eiern, an welchen man vor der Befruchtung nur eine ungleichpolige Achse erkennt, die bilaterale Symmetrie etwa durch die Eintrittstelle des Spermatozoons bestimmt wird.

3. Die Bestimmung der Medianebene durch die Eintrittsstelle des Spermatozoons. Roux führte zur Entscheidung der aufgeworfenen Frage lokalisierte Befruchtung am Froschei aus, wobei er am besten folgendermaßen verfuhr. Er legte an die unbefruchteten Eier dünne Seidenfäden an, welche bis über den Eiäquator hinaufreichten, über dem gewöhnlich die Samenfäden in das Ei eindringen. Unten wurde nun an den Faden ein Tropfen Samenflüssigkeit gebracht, welche infolgedessen nur in dem Meridian des Fadens bis über den Aequator hinaufgelangen konnte. Die Folge war, daß bei 90 bis 95% der Eier die erste Furche und mit ihr die Medianebene des Embryos ganz oder fast ganz mit dem Befruchtungsmeridian zusammenfiel. Roux gelang es außerdem, nachzuweisen, daß die Eintrittstelle des Spermatozoons zur ventrokaudalen Seite des Embryos wird. Die Tatsachen wurden für den typischen Fall auch von Brachet bestätigt, während bei störenden Nebenwirkungen im atypischen Fall, die Dotterbestandteile sich nicht symmetrisch um die Eintrittsstelle des Spermatozoons anordnen. Das zeigen die schon erwähnten Bornschen Befunde an Eiern, die mit ihrer primären Eiachse sehr geneigt auf die Glasplatte aufgesetzt und in dieser Zwangslage erhalten worden waren. Die Medianebene fiel bei diesen Eiern mit dem Strömungsmeridian zusammen, d. h. mit jenem Meridian, der durch den höchsten Punkt des absinkenden weißen und den tiefsten des aufsteigenden braunen Dotters hindurchging. In diesen Meridian fiel bei $^2/_3$ der Eier zugleich die zweite Furchungsebene. Es ist also hier die durch die Schwerkraft hervorgerufene Strömungsrichtung der verschieden schweren Eisubstanzen, welche die Dotterelemente symmetrisch um sich ordnet. Im typischen Falle aber bestimmt — wie gesagt — die Eintrittsstelle des Samenfadens die Medianebene des Embryos.

Wenn aber nun Doppelbefruchtung stattfindet, wie wird dann die Medianebene des Embryos bestimmt? Herlant hat die Antwort darauf gegeben, daß die Symmetrieebene genau zwischen den beiden Eintrittsstellen der Samenfäden hindurchgeht, mögen dieselben einander ganz nahe oder an entgegengesetzten Punkten der Eioberfläche liegen. Im Gegensatz zur typischen Entwickelung des monospermen Eies existiert bei den dispermen Eiern kein konstantes Zusammenfallen von Symmetriebene und erster Furche. Bei den trispermen Eiern fehlte aber auch die constante Beziehung der Symmetrieebene zu den Eintrittsstellen der Spermatozoen, und ganz dasselbe gilt nach den Untersuchungen von Brachet von den polyspermen Eiern mit noch mehr als drei Samenfäden. Trotz des Fehlens einer Beziehung zwischen Sameneintrittsstellen und Medianebene erhalten aber die tri- und polyspermen Eier von Rana fusca doch einen bilateralen Bau, der sich in dem Auftreten des grauen halbmondförmigen Feldes an der einen Seite des Eies zu erkennen gibt. Spricht schon das für die alte Ansicht von Oscar Schultze, daß dem Froschei von Haus aus ein bilateraler Bau zukommt, so

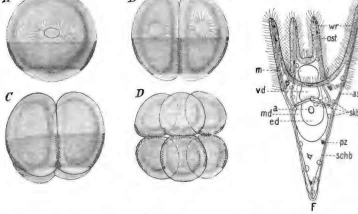
Digitized by Google

wird das letztere durch die Beobachtungen von Brachet bewiesen, welche derselbe an Eiern machte, die nach der Methode von Bataillon durch Anstich zur Parthenogenese angeregt worden waren. Bei diesen erscheint nämlich — und zwar ganz unabhängig von dem Anstichmeridian — ebenfalls nach ein paar Stunden der graue Halbmond an der einen Seite des Eies, genau so wie bei den befruchteten Kontrolleiern. Die Froscheier haben demnach einen primären bilateralen Bau, der zwar anfangs noch labil ist und bei Mono- oder Dispermie von den Spermatozoen noch umgeordnet und in dieser Neuordnung fixiert werden kann, der aber bei parthenogenetischer Entwickelung in seiner Ursprünglichkeit erhalten bleibt.

Diese Schlußfolgerung Brachets stimmt ganz mit der Ansicht überein, welche sich schon vorher Driesch über die Bilateralitätsfrage beim Seeigelei gebildet hatte. Boveri sah zwar in einer Anzahl von Eiern die erste Furche durch die Eintrittsstelle des Samenfadens gehen, so daß also auch hier die Medianebene der Larve durch den Befruchtungsmeridian gehen würde, wenn die erste Furche mit der Medianebene zusammenfällt, doch kann es sich auch hier nur um eine Drehung einer bereits vorhandenen bilateralen Struktur handeln, da die parthenogenetischen Eier auch bilateralen Larven den Ursprung geben, und die künstlichen Mittel, welche die Parthenogenese herbeiführen, allseitig auf die Eier einwirken.

4. Die Mosaikfurchung tierischer Eier. Es lassen sich aber nicht nur die Hauptrichtungen des künftigen Tieres in bestimmten Furchen des geteilten Eies erkennen, sondern es ist sogar den minutiösen Untersuchungen der deskriptiven Zoologen gelungen, einzelne Organe und einzelne Keimblätter ihrem Ursprung nach auf bestimmte Furchungszellen zurückzuführen. In diesen Fällen repräsentieren die Furchungsstadien sozusagen ein Mosaik von Anlagen, woraus sich die Berechtigung des Ausdruckes Mosaikfurchung ergibt. Wir wollen auf die drei klassischen Beispiele für Mosaikfurchung etwas näher eingehen, da wir ihre Kenntnis für das Verständnis des folgenden brauchen.

4a) Die Mosaikfurchung des Strongylocentrotus-Eies nach Boveri. Boveri hat am Ei von Strongylocentrotus lividus einen roten Ring auf-



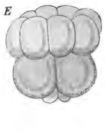


Fig. 3 A—E. Furchung des Strongylocentrotus-Eies bis zum 16-Zellenstadium. Nach Boveri. Aus Korschelt und Heider. Fig. 3 F Pluteus von Strongylocentrotus lividus. a After, ast Analarmstütze, ost Oralarmstütze, schb Scheitelbalken, m Mund, vd Vorderdarm, (rechts und links von diesem die beiden Cölomsäcke, der linke enthält die Wassergefäßanlage), md Mitteldarm, ed Enddarm, pz Pigmentzellen, skb Skelettbildner, wr Wimperring.

Digitized by Google

gefunden, welcher in den typischen Fällen mit seinem Durchmesser senkrecht auf der primären Eiachse steht und sich auf der einen Eihemisphäre ungefähr vom Aequator an bis nahe an den Pol heran erstreckt, an dem er eine kleine Kalotte freiläßt. Das Ei wird auf diese Weise in drei Regionen geteilt: eine pigmentfreie Halbkugel, eine pigmentierte Zone und eine pigmentfreie polare Kalotte (Fig. 3 A). Die ersten beiden Furchen gehen durch die primäre Eiachse und teilen das Ei in vier gleich große und gleich beschaffene Zellen, da jede einen Teil der drei Eiregionen zuerteilt erhält (Fig. 3 B u. C). Die dritte äquatoriale Teilung trennt dann die pigmentfreien Hälften der vier Zellen von den anderen Hälften mit dem roten Ring und der hellen Kalotte ab (Fig. 3 D). Die vier hellen Zellen des einen Poles teilen sich beim nächsten Teilungsschritt in acht gleiche Zellen, die zusammen einen Ring bilden, während sich die Zellen mit der roten Zone ungleich teilen, indem der größere pigmentierte Teil die kleinere helle Kalotte abschnürt. Von diesen acht Zellen bilden die vier Makromeren und die vier Mikromeren je einen Ring für sich; so daß das 16-Zellenstadium in seitlicher Ansicht den Anblick von Figur 3 E gewährt. Indem nun Boveri den roten Ring der Makromeren als Wegweiser benutzte, gelang es ihm, das Schicksal der drei Zellenkränze des 16-Zellenstadiums durch das Blastula- und Gastrulastadium hindurch bis zum Pluteus zu verfolgen. Als allgemeines Ergebnis stellte sich dabei heraus, daß der Mikromerenpol dem vegetativen Pole des Keimes entspricht, was bereits vorher Driesch aus dem Verhalten der isolierten Zellen des 8-Zellenstadiums abgeleitet hatte. Im Speziellen ergab sich dann weiter, daß aus den Mikromeren des 16-Zellenstadiums das primäre Mesenchym, welches die Skelett-

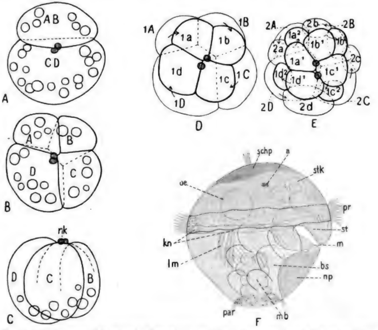


Fig. 4 A—F. Furchung bis zum 16-Zellenstadium und Trochophora von Nereis limbata. Nach E. B. Wilson. A, B, D u. E vom animalen Pol, C und F im Profil, F aus 2 Figuren Wilsons kombiniert und schematisiert. Die Oelkugeln sind in D und E fortgelassen. rk Richtungskörperchen, dunkel schraffiert. a Augenfleck, bs Borstensäcke, kn Kopfniere, lm Längsmuskeln, m Mund, mb Mesodermbänder, np Neuralplatte, oe Oelkugeln, par Paratroch, pr Prototroch, schp Scheitelplatte, st Stomodäum, stk Stirnkörper.

bildner liefert, hervorgeht, daß aus den Makromeren größtenteils Entoderm nebst Cölom- und Wassergefäßanlage, und aus den 8 animalen Zellen Ektoderm und seine Derivate entstehen. Man kann also bei den Seeigeln nicht nur bestimmte Keimblätter, sondern sogar bestimmte Organe auf bestimmte Furchungszellen des 16-Zellenstadiums zurückzuführen.

4b) Die Mosaikfurchung des Nereis-Eies nach Wilson. Zu demselben Resultat war lange vorher auch schon E. B. Wilson am Annelidenei gelangt. Das an Oelkugeln reiche Ei teilt sich zunächst in zwei Zellen von ungleicher Größe AB und CD (Fig. 4A), von denen sich die erstere bei der Vierteilung in ungefähr gleich große, die letztere dagegen in ungleich große Zellen teilt, und zwar so, daß die Zelle D größer ausfällt als C. Die zweite Furchungsebene fällt nach Wilsons Ermittelung hier mit der Medianebene des Embryos zusammen, doch ist das nur annähernd richtig, da die zweite Furchungsebene, wie Fig. 4B zeigt, nicht gerade, sondern wegen der starken Abplattung der Zellen gegeneinander gebrochen verläuft. Figur 4C läßt erkennen, daß die Oelkugeln im vegetativen Teile der vier Zellen liegen. Der animale Pol ist kenntlich an der Lage der Richtungskörperchen, welche in der Abbildung ebenfalls zu sehen sind. Bei der 8-Teilung schnürt nun jede der vier Zellen nach dem animalen Pole zu in dexiotroper Richtung eine ölkugelfreie Mikromere ab, so daß die zu jeder Makromere (z. B. 1A) gehörige Mikromere (z. B. 1a) nach rechts verschoben ist (Fig. 4D). Im Gegensatz zu diesem ersten Mikromerenquartett erfolgt bei dem nächsten Teilungsschritt die Abschnürung des zweiten in läotroper Richtung, so daß jetzt die zu jeder Makromere (z. B. 2A) gehörige Mikromere (z. B. 2a) nach links hin verlagert ist. Von den Zellen dieses zweiten Quartetts zeichnet sich die von 1D abgeschnürte Zelle 2d durch besondere Größe aus, sie wird auch wegen ihrer Bedeutung für den Aufbau des Larvenkörpers als erster Somatoblast bezeichnet. Die Zellen des ersten Mikromerenquartettes teilen sich inäqual in die den animalen Pol bildenden Zellen $1a^1$, $1b^1$, $1c^1$ und $1d^1$ und die die Zwischenräume zwischen diesen einnehmenden Zellen $1a^2$, $1b^2$, $1c^2$ und $1d^2$. Zwischen diesen letzteren liegen dann wieder die Zellen des zweiten Mikromerenquartettes 2a, 2b, 2c und 2d, so daß ein außerordentlich regelmäßiges Furchungsbild (Fig. 4E) zustande kommt. Die verschiedenen Körperpartien, Keimblätter und Organanlagen der in Figur 4F dargestellten Larve lassen sich nun alle auf bestimmte Zellen des in Figur 4E abgebildeten 16-Zellenstadiums zurückführen: Die vier Zellen des animalen Poles, $1a^1$, $1b^1$, $1c^1$ und $1d^1$, liefern nämlich die Scheitelplatte der Larve (schp), die Cerebralganglien des Tieres, am Prototroch gelegene Zellen drüsigen Charakters, welche von Wilson als Kopfniere (kn) bezeichnet werden, und die allgemeine Körperbedeckung der oberen Hemisphäre der Trochophora. Die Zellen $1a^2$, $1b^2$, $1c^2$ und $1d^2$ liefern den Prototroch (pr) d. h. den Wimperkranz, welcher die Larve vor dem Munde umgürtet. Von dem zweiten Mikromerenquartett liefert die Zelle 2d, der sogenannte erste Somatoblast, die Neuralplatte d. h. die Anlage des Bauchmarkes (np), die Borstensäcke (bs), das Ektoderm der postoralen ventralen und seitlichen Körperpartien und jenes der mittleren dorsalen Rumpfregion, während aus den kleineren Zellen 2a, 2b und 2c das Stomodäum (st), das zirkumorale Ektoderm und jenes der seitlichen dorsalen Rumpfregionen hervorgehen. Von den Makromeren beteiligen sich alle vier an dem Aufbau des Darmkanales. Die Zelle 2D liefert außerdem aber die Mesodermbänder (mb) und die Geschlechtszellen. Das Entoderm besteht bei Nereis auf dem abgebildeten Stadium immer noch aus nur 4 großen, Oeltropfen enthaltenden Zellen.

4c) Die Mosaikfurchung des Eies von Ascaris megalocephala. Als letztes klassisches Beispiel der Mosaikfurchung sei der Beginn der Entwickelung des Eies vom Pferdespulwurm nach den Untersuchungen Boveris geschildert: Die erste Furche teilt das Ei in zwei Zellen, welche gewöhnlich in bezug auf Größe und Dottergehalt verschieden ausfallen, wie das z. B. bei dem in Figur 5A abgebildeten Ei der Fall war. Die Zelle AB ist hier dotterärmer und größer als die Zelle P_1. Erstere liefert nur Ektoderm, während die Zelle P_1 in der Folge noch Ektoderm, das gesamte Ento- und Mesoderm und die Urgeschlechtszelle aus sich hervorgehen läßt. Die erste Furche entspricht nicht der Medianebene des Embryos und ist nicht als meridionale, sondern als äquatoriale zu bezeichnen, da sie die primäre Eiachse senkrecht schneidet. Eine weitere Differenzierung ist auf dem 4-Zellenstadium eingetreten. Während sich nämlich der primäre Ektoblast (AB) in die beiden gleichwertigen Zellen A und B geteilt hat, ist die andere (P_1) dabei, sich in die beiden ungleichwertigen Zellen P_2 und EMSt zu zerschnüren. Die Zelle P_2, welche in Figur 5B an der Spitze des ungefähr pyramidenförmigen Stadiums liegt, liefert in Zukunft nur noch einen Teil des Ektoderms und die Urgeschlechtszelle, während die andere das gesamte Ento- und Mesoderm und außerdem das Stomodäum aus sich hervorgehen läßt. Die Zelle P_2 gleitet nunmehr von der Spitze

Digitized by Google

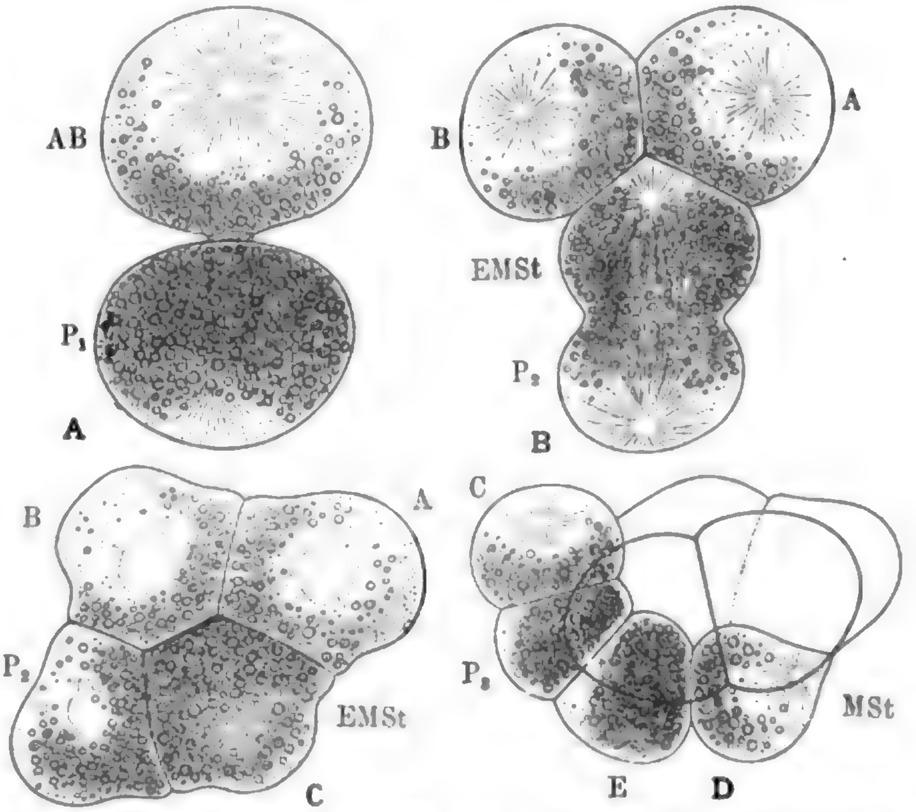


Fig. 5 A—D. Furchung des Eies von **Ascaris megalocephala** bis zum 8-Zellenstadium. Nach Boveri.

der Pyramide herab und lagert sich zwischen die Tochterzelle B des primären Ektoblasten und die Zelle EMSt hinein, so daß das in Figur 5C dargestellte Bild entsteht. Jetzt sind die Hauptrichtungen des Embryos deutlich zu erkennen: Die herabgeglittene Zelle P_2 bezeichnet das Hinterende, die gegenüberliegende Ektodermzelle A das Vorderende, beide Ektodermzellen A und B zusammen dorsal und P_2 und EMSt ventral. Die Ebene, welche durch den größten Durchmesser aller vier Zellen geht, ist die Medianebene. Bei dem nächsten Teilungsschritt teilen sich die Zellen A und B in eine rechte und linke Zelle, die Zelle P_2 schnürt nach oben hin den sekundären Ektoblasten C ab, welcher die sogenannten Schwanzzellen liefert, die Zelle EMSt trennt sich dagegen in die Entodermzelle E und in die vor ihr zu liegen kommende Anlage für das Mesoderm und das Stomodäum (MSt). Zur Trennung der Mesoderm- und der Stomodäumanlage kommt es erst auf dem Stadium von 24 Zellen, auf dem auch die vierte Ursomazelle von der Zelle P_3 abgeschnürt wird, die dadurch zu P_4, der Urgeschlechtszelle, wird. Ebenso wie bei Nereis lassen sich also auch bei Ascaris nicht nur die einzelnen Keimblätter, sondern sogar auch Organanlagen auf bestimmte Furchungszellen zurückführen. Der Fall von Ascaris ist aber durch eine weitere Entdeckung von Boveri noch viel interessanter geworden als die anderen Beispiele von Mosaikfurchung. Er fand nämlich, daß sich die Zellenfolge, welche zu den Geschlechtszellen hinführt, von den übrigen Körperzellen durch eine verschiedene Beschaffenheit der Kerne auszeichnet. Es haben nämlich nur die Kerne der P-Reihe die volle Menge Chromatin, die Somazellen aber nicht. Nehmen wir als Beispiel die Varietät univalens von Ascaris megalocephala, welche in dem Kopulationskern des befruchteten Eies zwei Chromosomen aufweist, so werden bei der ersten Furchungsteilung sowohl der ersten Ursomazelle AB wie der Zelle P_1 zwei schleifenförmige Chromosomen zuerteilt. Wenn sich die beiden Zellen aber zum zweiten Teilungsschritt anschicken (Fig. 6), dann teilt sich nur die Zelle P_1 wieder mit den beiden langen schleifenförmigen Chromosomen, deren Spalthälften also in die Zelle P_2 und in EMSt gelangen. In der Zelle AB sind dagegen die beiden angeschwollenen Enden jedes Chromosoms vor der Spaltung abgetrennt worden, und sind die mittleren Partien jedes Chromosoms in eine große Zahl

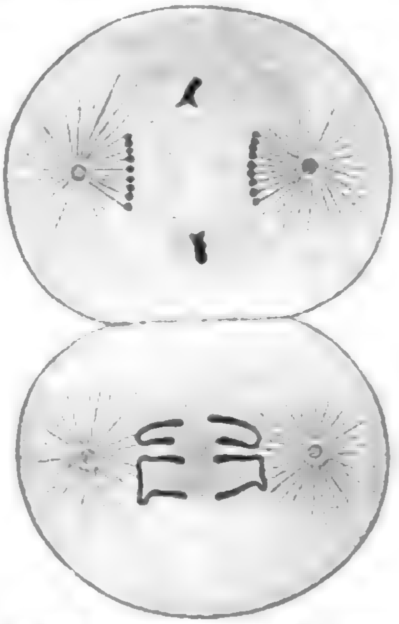


Fig. 6. Diminutionsprozeß der Kernsubstanzen bei der Teilung der Ektoblastzelle AB des Zweizellenstadiums von **Ascaris megalocephala**. Nach Boveri.

Digitized by Google

kleiner körnchenförmiger Chromosomen zerfallen, welche sich allein an den weiteren Teilungen beteiligen, während die abgestoßenen keulenförmigen Enden zugrunde gehen. Diese Diminution des Kernmaterials vollzieht sich in sämtlichen vier von den P-Zellen abgeschnürten Ursomazellen, während die Urgeschlechtszelle bei allen ihren Teilungen die beiden langen schleifenförmigen Chromosomen mit den keulenförmigen Enden bewahren. Zu der Mosaikfurchung gesellt sich also bei Ascaris sogar noch eine Differenzierung des Kernapparates zwischen Geschlechtszellenanlage und Somaanlagen auf frühesten Stadien der Entwickelung hinzu.

5. Sind die Orte der Keimblätter- und Organbildung schon am ungefurchten Ei zu erkennen? Diese Frage schließt sich notwendig an den vorstehenden Nachweis der Möglichkeit der Zurückführung bestimmter Bildungen des Embryos auf bestimmte Furchungszellen an. Sie ist in einer Reihe von Fällen mit Ja zu beantworten, wie folgende zwei Beispiele zeigen.

5a) Organbildende Regionen am ungefurchten Ei von Strongylocentrotus lividus. Nach den Befunden von Boveri sind an dem Strongylocentrotus-Ei die Regionen für die Bildung der Skelettbildner, des Darmes und des Ektoderms auch schon am reifen, ungefurchten Ei zu erkennen, gleichgültig, ob dasselbe bereits befruchtet oder noch unbefruchtet ist, wie Figur 7 zeigt, die ein reifes, unbefruchtetes Ei dieses Seeigels wiedergibt.

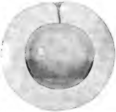


Fig. 7. Reifes, unbefruchtetes Ei von Strongylocentrotus lividus. Nach Boveri. Aus Korschelt und Heider.

5b) Organbildende Regionen am ungefurchten, aber befruchteten Ei von Cynthia partita. Nach den Untersuchungen von Conklin lassen sich auch an den befruchteten Eiern dieser Ascidie bereits vor der Furchung bestimmte Eibezirke mit bestimmten Keimblättern in Beziehung bringen. Streng gilt das allerdings nur für den an der einen Seite der vegetativen Eihälfte gelegenen gelben Halbmond, der in Figur 8A rechts zu sehen ist. Aus ihm geht das Mesoderm hervor, und seine Lage bezeichnet hinten. Man kann also am Ei einen deutlichen bilateralen Bau wahrnehmen, wie namentlich auch Figur 8B zeigt, welche dasselbe von hinten gesehen darstellt. Wenn wir von dem gelben Halbmond absehen, liefert die vegetative Hemisphäre des Eies größtenteils Entoderm, während die animale Ektoderm aus sich hervorgehen läßt. Allerdings ist das Material für das letztere am ungefurchten Ei noch nicht alles an der animalen Eihälfte angesammelt, sondern es liegt helles Plasma, welches in die Ektodermzellen hineingelangt, in der vegetativen Hemisphäre unter dem gelben Halbmond, unter welchem es nach dem Aequator zu als heller Streifen (vgl. Fig. 8A und B) hervorsieht. Wie Figur 8C erkennen läßt, hat sich dieses helle Plasma nach der Furchung in der animalen Hälfte der Blastomeren angesammelt. Man unterscheidet jetzt den hellen, ektodermalen, den gelben, mesodermalen und den grauen, entodermalen Bezirk der Blastomeren, neben denen nach Conklins Angaben an der Vorderseite des Keimes in der Nähe des Aequators noch ein etwas heller als der entodermale Teil erscheinender Bezirk vorhanden ist, welcher die gemeinsame Anlage von Chorda und Nervenrohr enthalten soll.

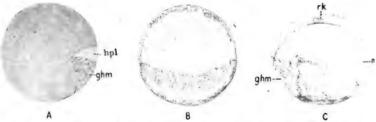


Fig. 8. Reifes, befruchtetes Ei von Cynthia partita. Nach Conklin. Schematisiert. A von der Seite, B von hinten, C Zweizellenstadium von der Seite. ghm gelber Halbmond, hpl helles Plasma, n Material für Chorda und Nervenrohr, rk Richtungskörper.

Digitized by Google

Von der Verteilung dieser Bezirke ist aber im Gegensatz zum Strongylocentrotus-Ei vor der Befruchtung noch nichts zu sehen. Woher kommt das? Es kommt daher, daß im ersteren Falle die Reifung des Eies bereits vor der Befruchtung stattfindet, während sie im letzteren Falle erst nach dem Eindringen des Spermatozoons in das Ei eingeleitet wird. Die Differenzierung zwischen den beiden Eisorten weist uns somit auf einen neuen Punkt hin.

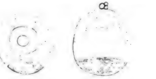
6. Die Bedeutung der Reifung für die Verteilung der organbildenden Eibezirke. Wir wollen auch das wieder an der Hand einiger Beispiele klar machen.

6a) Die Veränderung des Eibaues durch die Reifung bei Strongylocentrotus lividus. Wie beistehende Figur 9 zeigt, weist das unreife Strongylo-

Fig. 9. Unreifes Ei von Strongylocentrotus lividus. Nach Boveri. Aus Korschelt und Heider.

centrotus-Ei noch nicht die typische Schichtung des reifen auf. Das rote Pigment ist vielmehr gleichmäßig über die ganze Oberfläche des Eies verbreitet. Trotz alledem kann man auch am unreifen Ei schon die primäre Eiachse wahrnehmen. Das Ei ist nämlich von einer dicken Gallerthülle umgeben, welche an einer Stelle einen Porus erkennen läßt. In diesen Porus hinein werden die beiden Polkörperchen abgeschnürt. Die primäre Eiachse erstreckt sich durch den Gallerthüllenporus und das Eizentrum nach der gegenüberliegenden Eiseite. Nach der Reifung des Eies wird nun auch die Schichtung des Plasmas in der Richtung der Eiachse deutlich sichtbar. Es hat nämlich dabei eine Substanzordnung stattgefunden, welche die Ansammlung des roten Pigmentes zwischen dem Aequator und dem hell bleibenden vegetativen Pol des Eies zur Folge hat. So entsteht aus Figur 9 das Bild der Figur 7.

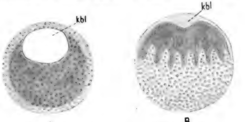
6b) Die Veränderung des Eibaues durch die Reifung bei Myzostoma glabrum. Ganz ähnliche Umänderungen des Eibaues, wie sie Boveri bei Strongylocentrotus bei der Reifung konstatierte, hatte schon vorher Driesch am Myzostoma-Ei (Figur 10) beobachtet. Dasselbe beginnt



A B

Fig. 10. Unreifes (A) und reifes (B) Ei von Myzostoma. Schematisch. Nach Driesch.

erst zu reifen, nachdem das Spermatozoon in das Ei eingedrungen ist. Man bemerkt an dem einen Pole des unreifen Eies eine scharf abgegrenzte schwärzlich grüne Masse, so daß also eine polare Struktur auch schon vor der Reifung zu sehen ist. Der übrige Teil des unreifen Eies zeigt eine gleichmäßig verteilte rötliche Substanz. Diese ist es vor allen Dingen, auf welche sich die Umordnung während der Reifung erstreckt. Sie sammelt sich nämlich an dem animalen Pole des Eies, welcher der schwärzlich grünen Masse gegenüberliegt und an dem sich die Richtungskörperchen bilden, in Form einer Kalotte an, welche ungefähr $^1/_3$ der Eioberfläche ausmacht. Zwischen der schwärzlich grünen Masse, welche sich am vegetativen Pole etwas ausgebreitet hat, und der rötlichen



A B

Fig. 11. Unreifes (A) und reifendes Ei (B) von Cynthia partita. Schematisch. Nach Conklin. In A gelbe Substanz oberflächlich, graue darunter. In B strömt gelbe Substanz nach dem vegetativen Pole zu und wird graue freigelegt. kbl Keimbläschen, das in B seinen Kernsaft in das Plasma ergießt und so die Zone hellen Plasmas schafft, die auch nach dem vegetativen Pole zu abströmt.

Google

Kalotte befindet sich nunmehr ein breiter heller Ring. Die schwärzlich grüne Masse gelangt bei der Teilung in den sogenannten Dottersack, dann in die Zelle CD, hierauf in D, ein Teil später in 2d und der Rest wahrscheinlich in den Mesoblasten. Die rötliche Substanz gelangt in die Mikromeren und die helle in die Entomeren.

6c) Die Veränderungen des Eibaues durch die Reifung bei Cynthia partita. Wie die nach Conklin hergestellte Abbildung 11A zeigt, besitzt das unbefruchtete Ei von Cynthia einen ganz anderen Bau als das reife befruchtete (Fig. 8A und B). Die gelbe Substanz, welche dort den Halbmond bildete, ist hier über die ganze Eioberfläche verbreitet. Unter ihr liegt die graue Substanz, die ebenfalls im Gegensatz zum 2-Zellenstadium (Fig. 8C) noch keine Lokalisation erkennen läßt. Das große Keimbläschen liegt an dem einen Pole des Eies. In Figur 11B sieht man den Beginn der Substanzumordnung vor sich. Das Ei ist befruchtet und in Reife eingetreten, denn man sieht, daß das Keimbläschen geplatzt ist und daß es seinen Inhalt nach außen ergossen hat. Dadurch ist eine Zone hellen Plasmas am animalen Pole des Eies entstanden, welche nach dem vegetativen Pole zuzuströmen beginnt, ebenso wie die gelbe Substanz, welche in Figur 11B bereits einen Teil des unter ihr liegenden grauen Plasmas bloßgelegt hat. Sind gelbe und weiße Substanz am vegetativen Pole angelangt, so wandern beide nach hinten und äquatorwärts, wo sich die gelbe in Form eine Halbmondes anordnet, während das helle Plasma unter sie zu liegen kommt und äquatorwärts etwas unter ihr hervorragt. So ist das in Figur 8A und B dargestellte Bild entstanden.

7. Das Prinzip der organbildenden Keimbezirke (His) **und die Begriffe: prospektive Bedeutung und prospektive Potenz** (Driesch). Wir haben in den vorhergehenden Kapiteln gesehen, daß es in vielen Fällen gelungen ist, nicht nur mit Roux bestimmte Körperregionen, sondern sogar bestimmte Keimblätter, ja Organanlagen auf bestimmte Furchungszellen oder gar auf bestimmte Bezirke des ungefurchten reifen Eies zurückzuführen. Wir sind damit auf rein induktivem Wege zu einem Satz gelangt, den W. His bereits im Jahre 1874 in seiner Schrift „über unsere Körperform“ aufgestellt und als das Prinzip der organbildenden Keimbezirke bezeichnet hatte. Faßt man dasselbe in dem einfachen deskriptiven Sinn auf, daß die Organe ihrer Anlage nach auf bestimmte Keim- resp. Eibezirke zurückzuführen sind, so ist dasselbe, wie O. Hertwig einmal sagte, eigentlich eine selbsverständliche Sache. Denn da der Embryo aus dem Ei hervorgeht, so muß es bei genauer Beobachtung auch gelingen, bestimmte Teile des ersteren auf bestimmte Bezirke des letzteren zurückzuführen. Daß also jeder Eiteil im normalen Verlauf der Entwickelung ein bestimmtes Schicksal, eine bestimmte prospektive Bedeutung — um ein Wort von Driesch zu gebrauchen — haben muß, ist selbstverständlich, fraglich ist aber, ob dieses Schicksal ganz genau fixiert ist, oder ob es bei veränderter Bedingungskonstellation auch anders ausfallen kann d. h., um wieder Drieschs Worte zu gebrauchen, ob die prospektive Bedeutung einer Furchungszelle oder eines Eibezirkes identisch ist mit ihrer prospektiven Potenz oder ob letztere weiter ist als erstere. Zur Entscheidung dieser Frage, die für die Biologie von fundamentaler Bedeutung geworden ist, genügt die einfache Beschreibung nicht, sondern ist das Experiment notwendig. Das

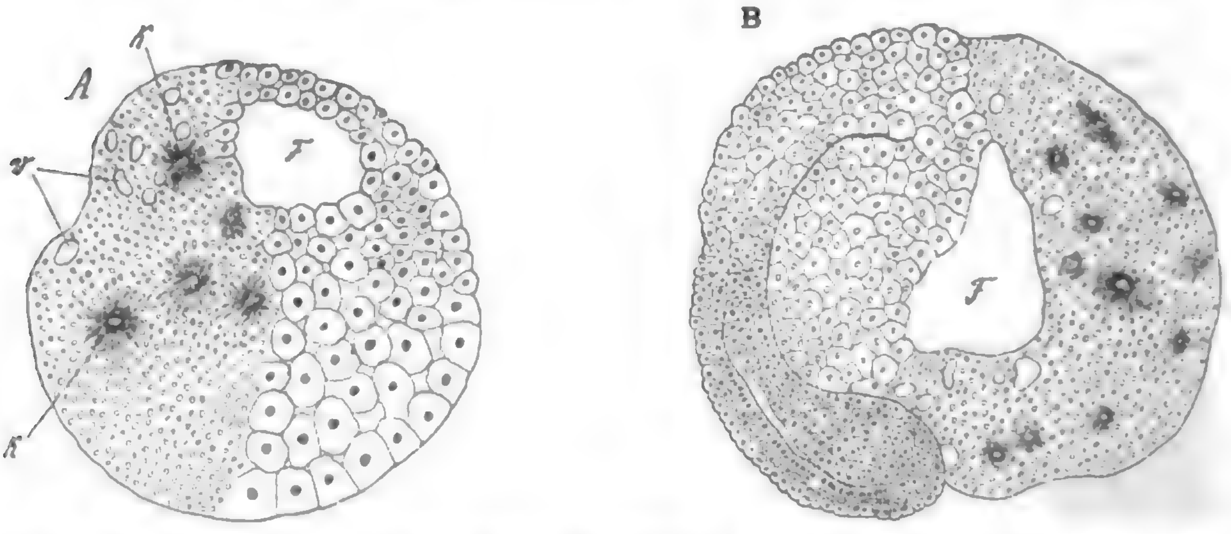


Fig. 12. A Medianschnitt durch eine Hemiblastula. B schräger Längsschnitt durch eine Hemigastrula lateralis des Frosches. Nach Roux. Aus Korschelt und Heider. In der nicht zellulierten Hälfte Vakuolen (v) und einzelne Kerne (k).

Digitized by Google

fühlte auch Roux, als er seinen anfänglich rein deskriptiven Untersuchungen über das Zusammenfallen der ersten Furche des Froscheies mit der Medianebene des Embryos das Experiment folgen ließ.

B. Experimenteller Teil.

B_1. Die Trennung der Blastomeren und ihre Folgen.

1. **„Ueber die künstliche Hervorbringung halber Embryonen nach Zerstörung einer der beiden ersten Furchungskugeln, sowie über die Nachentwickelung (Postgeneration) der fehlenden Körperhälfte".** So lautet der Titel von Roux's berühmter Arbeit vom Jahre 1888. Mit Hilfe einer heißen Nadel tötete Roux eine der beiden ersten Blastomeren des Froscheies ab. Indem er nun die Weiterentwickelung der überlebenden Eihälfte beobachtete, stellte es sich heraus, daß sich dieselbe zu einer Semimorula, Semiblastula (Fig. 12A) Semigastrula (Fig. 12B), ja in günstigen Fällen zu einem Semiembryo ausbildete. Wie die in Figur 13A

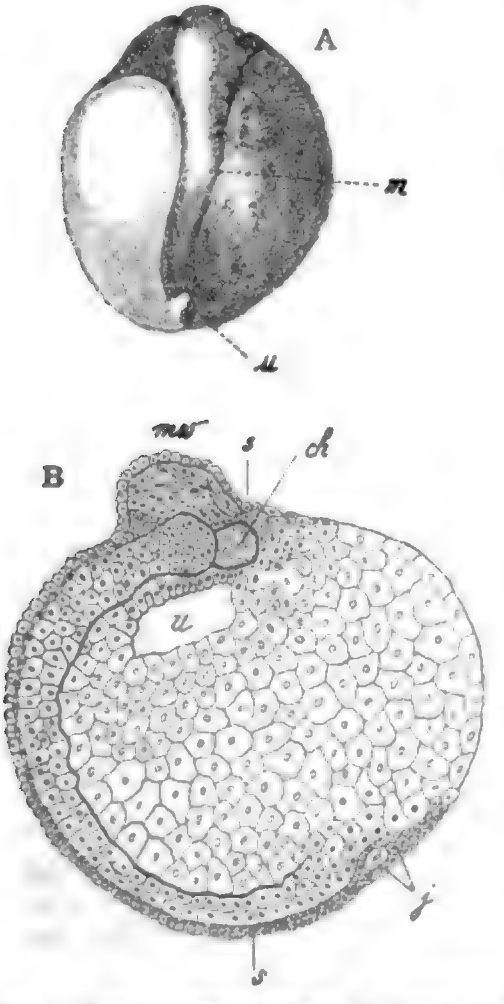
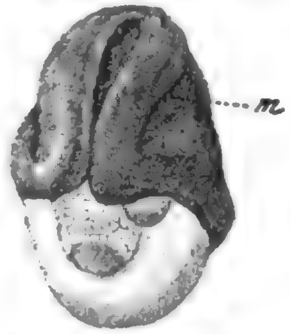


Fig. 13. A Hemiembryo dexter. B Hemiembryo sinister. Im Querschnitt. m resp. mw Medullarwulst, u in A offengebliebener Teil des Urmundes, in B Urdarm, ch Chorda, j „jugendlich gebliebene" Furchungszellen. In B ist die angestochene Hälfte vollständig nachzelluliert. Beginn der Postgeneration. Nach Roux. Aus Korschelt und Heider.

in Totalansicht und in Figur 13B im Querschnitt dargestellten Beispiele erkennen lassen, besaßen diese halben Embryonen nur einen Medullarwulst, nur eine Reihe von Ursegmenten und eine nur bis zur Chorda reichende Urdarmhöhle, während die Chorda selber einen runden oder schwach ovalen Querschnitt aufwies. Roux erhielt nach Abtöten einer der beiden ersten Furchungszellen manchmal auch vordere halbe Embryonen, Hemiembryones anteriores (Fig. 14), was er mit Recht durch die Annahme

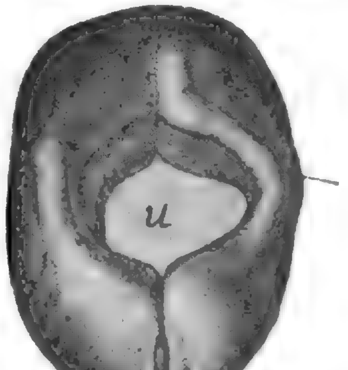
Fig. 14. Hemiembryo anterior. Nach Roux. Aus Korschelt und Heider.



erklärt, daß in diesen Fällen nicht die erste, sondern die zweite Furche mit der Medianebene des Embryos zusammenfiel.

Roux suchte dann auch durch Abtöten jener beiden Zellen des Vierzellenstadiums, die man annähernd als die hinteren bezeichnen kann, vordere Halbembryonen zu züchten, und es gelang ihm auch, eine erhebliche Anzahl von Semigastrulis anterioribus zu erhalten, aus denen aber nur vier vordere Halbembryonen hervorgingen, da sich die anderen vorher durch Postgenerationsprozesse zu Ganzbildungen ergänzten. Von hinteren Halbbildungen kamen dagegen keine sicheren Fälle zur Beobachtung. Roux hat jedoch nach Abtöten einer Zelle des Vierzellenstadiums einige Dreiviertelblastulae erhalten, aus denen zwei Dreiviertelembryonen hervorgingen. Einem derselben fehlte, wie Figur 15 zeigt, das linke vordere

Fig. 15. Dreiviertelembryo mit Asyntaxia medullaris. Nach Roux. Aus Barfurth in O. Hertwigs Handbuch der Entwickelungslehre.



Viertel, so daß von dem linken Medullarwulst nur die hintere Hälfte vorhanden war. Roux hält diesen Dreiviertelembryo für ebenso lehrreich wie einen reinen Hemiembryo posterior.

Digitized by Google

Wurden auf dem 8-Zellenstadium die vier unterhalb der äquatorialen Furche gelegenen Zellen abgetötet, so entstanden einige deutliche Semiblastulae superiores, bei denen nur das Dach des Blastocöls aus Zellen bestand, während der Boden von der nicht in Zellen zerklüfteten Masse der abgetöteten Blastomeren gebildet wurde.

Roux's Resultat von der Erzeugung halber Embryonen aus einer überlebenden Zelle des Zweizellenstadiums des Froscheies wurde von einer ganzen Reihe von Forschern bestätigt. Wir wollen von diesen nur Brachet nennen, da die Resultate desselben nicht nur geeignet sind, die einzigen entgegenstehenden Angaben, die von O. Hertwig, aufzuklären, sondern da dieselben uns auch noch einen Schritt weiter in unserer Erkenntnis bringen werden. Brachet wies nämlich darauf hin, daß man nur dann aus der überlebenden Blastomere einen halben rechten oder linken Embryo zu erhalten erwarten darf, wenn die erste Furche ganz oder annähernd mit der Symmetrieebene des Eies zusammenfällt, denn es ist für die Symmetrieebene des Embryos die des Eies und nicht der Verlauf der ersten Furche ausschlaggebend. Das wurde von ihm durch Versuche nachgewiesen, bei denen verschiedene Kategorien von Zweizellenstadien angestochen wurden, einmal nämlich solche, wo die Furchungsebene ganz oder nahezu mit der Symmetrieebene des Eies zusammenfiel, dann solche, wo sie mit der letzteren einen rechten, und schließlich solche, wo sie mit ihr einen Winkel von ca. 45° bildete. Im ersteren Falle entstanden typische rechte oder linke halbe Embryonen und im zweiten vordere Embryonen, denen aber nicht die ganze hintere Hälfte des Medullarrohres, sondern wegen der schiefen Lage des virtuellen Embryos im Ei von Rana fusca nur das hintere Ende der Axialorgane fehlte. Aus der dritten Gruppe von Eiern gingen dagegen, wenn die „hintere“ Blastomere abgetötet worden war, in der überlebenden Furchungszelle also $^3/_4$ des grauen Feldes erhalten geblieben waren, Dreiviertelembryonen hervor. Es ist deshalb mehr als wahrscheinlich, daß sich die abweichenden Resultate O. Hertwigs, der nach Anstich einer der beiden ersten Blastomeren bis auf einen Fall nur ganze Embryonen mit Defekten erhalten hatte, mindestens zum Teil dadurch erklären, daß er fast ausschließlich solche Zweistadien angestochen hatte, bei denen die Furchungsebene mit der Symmetrieebene des Eies einen größeren Winkel bildete. Daneben mögen auch — wie Roux vermutete — Postgenerationserscheinungen, auf die wir noch zu sprechen kommen werden, an den Ergebnissen Hertwigs schuld gewesen sein.

Es ist deshalb das Rouxsche Resultat der Entstehung rechter oder linker halber Embryonen nach Abtöten der einen Blastomere des zweigeteilten Froscheies für den „typischen“ Fall, bei dem die erste Furche mit der Symmetrieebene des Eies zusammenfällt, als gesichert anzusehen.

Es liegt auf der Hand, daß diese Resultate den deskriptiven Befunden über die Beziehung der ersten Furchungsebenen des Froscheies zu den Hauptrichtungen des Embryos einen tieferen Sinn zu geben und zu beweisen scheinen, daß in der Tat schon auf so frühen Stadien bestimmte Zellen zur Lieferung bestimmter Körperpartien determiniert sind. Roux schloß infolgedessen aus den Resultaten seiner Experimente, daß die erste Furche das Keimmaterial qualitativ ungleich scheide, nämlich in das Material für eine rechte und in jenes für eine linke Körperhälfte, die sich beide von selbst, ohne daß eine gestaltliche Beeinflussung der einen Körperhälfte auf die andere erforderlich ist, zu dem differenzieren, wozu sie bestimmt sind. Er spricht deshalb von einer „Selbstdifferenzierung“ der ersten beiden Furchungszellen, denen er nicht nur das Bildungsmaterial für die beiden Körperhälften, sondern auch „die differenzierenden und gestaltenden Kräfte“ zur Umformung dieses Materials in die Organe und Gewebe des Embryos zuschreibt. Da nun auch Zellen des Viererstadiums aus der Entwickelung ausgeschlossen, und dadurch Dreiviertelembryonen gezüchtet werden können, so dehnt Roux den Satz auch auf das Vierzellenstadium aus und sagt: „Die Entwickelung der Froschgastrula und des zunächst daraus hervorgehenden Embryos ist von der zweiten Furchung an eine Mosaikarbeit und zwar aus mindestens vier vertikalen, sich selbständig entwickelnden Stücken.“

Angesichts weiterer Tatsachen mußte aber Roux den Schluß auf die qualitative Materialscheidung durch die Furchung noch mehr präzisieren und auf den aktivierten Teil des Bildungsmaterials einschränken. Er beobachtete nämlich, daß sich seine Halbkeime als Semiblastulae, Semigastrulae, ja sogar noch als Hemiembryonen zu Ganzbildungen umzuwandeln begannen. Er nennt diesen Prozeß der Erzeugung von ganzen Embryonen aus halben Postgeneration, da der Name Regeneration hier nicht angebracht ist, denn es war ja in diesen Fällen vorher auf der operierten Seite noch gar nichts gebildet worden, das wiedererzeugt werden konnte. Diese Postgeneration der Halbkeime vollzieht sich nach Roux äußerst rasch, so daß ein halber Tag oder eine Nacht oft vollkommen genügt, um einen Hemiembryo lateralis in einen ganzen Embryo mit schönen Medullarwülsten zu verwandeln. Das Problem der Postgeneration ist noch jetzt eines der

Digitized by Google

umstrittensten Gebiete der entwickelungsmechanischen Forschung. Freilich steht wohl die einfache Tatsache der Nacherzeugung der anfänglich fehlenden Hälfte gesichert da, aber über die Arten und Weisen, nach denen sie sich vollzieht, gehen die Meinungen bis auf zwei Punkte noch weit auseinander. Diese beiden Prozesse, in bezug auf welche Einstimmigkeit herrscht, sind erstens die einfach verspätete Entwickelung der operierten, aber durch das Anstechen nur geschädigten, nicht abgetöteten Zelle und zweitens die Ueberhäutung der abgetöteten Hälfte durch Proliferation der Zellen, vornehmlich des Ektoderms, der entwickelten Seite. Von diesen beiden Prozessen ist aber der erstere seinem Wesen nach gar nicht, sondern nur seinem Tempo nach von der typischen, ungestörten Entwickelung verschieden, so daß ihm also der regulative Charakter abgeht. Dieser ist jedoch dem zweiten Prozesse eigen, da hierbei das Material der entwickelten Zelle etwas leistet, was es normalerweise nicht tut, und durch diese Leistung den abnormen Zustand des Keimes wieder zur Norm zurückführt. Abgesehen von diesen beiden nicht mehr umstrittenen Postgenerationsprozessen werden von Roux und neuerdings wieder von Laqueur aber auch noch andere Prozesse angeführt, die bei der Umwandlung der Halbkeime zu Ganzkeimen eine Rolle spielen sollen, doch ist die Deutung der Bilder außerordentlich schwierig. Immerhin muß man angesichts der Arbeiten beider Autoren wenigstens die Möglichkeit des Vorkommens noch anderer Postgenerationsprozesse zugestehen. Das gilt vor allen Dingen von der Postgeneration ohne Verwendung von Material der operierten Zelle. Hierbei wird zur Herstellung der Ganzbildung aus der Halbbildung im Gegensatz zu anderen Postgenerationsarten gar kein Material von der operierten Zelle verwendet, sondern es wird der anfänglich halbe Keim von Material, das er selber liefert, zum Ganzkeim umgebildet. Bei dieser Art von Postgeneration würde natürlich die überlebende Hälfte erst recht mehr als während des ungestörten Entwickelungsverlaufes leisten. Während die anfängliche Halbbildung also daraufhin zu deuten schien, daß schon auf dem Zweizellenstadium die Potenzen der beiden Zellen beschränkt sind, zeigen die Prozesse der Postgeneration, bei denen sich an der Nachbildung der fehlenden Hälfte mehr oder weniger Material der bereits entwickelten Hälfte beteiligt, daß die Potenzen der letzteren in Wirklichkeit doch noch größer sind, als sie anfänglich zu sein schienen. Roux drückt dies mit anderen Worten so aus: Bei der Furchung wird zwar das Bildungsmaterial für die einzelnen Körperregionen und Organe qualitativ geschieden, aber es erstreckt sich diese Scheidung nur auf das aktivierte Bildungsmaterial, während neben diesem noch Bildungsmaterial in inaktivem Zustande erhalten bleibt, das bei Störungen des „typischen" Entwickelungsverlaufes in Tätigkeit tritt und regulativ wieder die Norm herbeiführt.

Man kann sich diese Rouxsche Auffassung von der Verteilung der Entwickelungspotenzen nicht nur durch die hypothetische Annahme aktivierten und inaktiven Bildungsmaterials, sondern auch durch folgendes Bild aus der Uhrenfabrikation plausibel machen: Früher, als der geringere Absatz noch nicht die Massenherstellung von Uhren nötig machte, stellte jeder Uhrmacher seine Uhren vollständig her. Damals bestand also eine Uhrmacherkolonie aus lauter einzelnen Individuen, von denen jedes alle Teile einer Uhr herstellen konnte und auch herstellte. Jetzt aber, wo in einer Uhrmacherkolonie Massen von Uhren hergestellt werden, lernt zwar auch noch zu Anfang jeder Arbeiter eine ganze Uhr fabrizieren, muß jedoch, sobald er in den Massenbetrieb eintritt, seine Fähigkeiten auf einen bestimmten Punkt, also z. B. auf die Herstellung eines bestimmten Rädchens einstellen, das er dann fortwährend, eventuell sein Leben lang, erzeugt. Da er aber von Haus aus auch das Herstellen ganzer Uhren kann, so kann er, falls in der Kolonie aus irgendeinem Grunde die Zahl der Arbeiter einer Kategorie verringert wird, und er noch nicht alles wegen zu langer einseitiger Tätigkeit vergessen hat, noch umlernen und die Erzeugung eines anderen Uhrteiles übernehmen. Der gelernte Uhrmacher ist also im Massenbetrieb beim „typischen" Fabrikationsverlauf für eine bestimmte Leistung determiniert, aber noch nicht in unabänderlicher Weise, denn er kann, wenn er seinen einseitigen Beruf noch nicht zu lange ausgeführt und sein Gedächtnis nicht vollständig verloren hat, bei einer Störung des normalen Getriebes, im „atypischen Falle", noch eine andere Leistung übernehmen. Die Uebertragung dieses Bildes auf die Entwickelungserscheinungen ist einfach: Die Eier eines Eierstockes sind die Individuen einer Uhrmacherkolonie aus früherer Zeit, von denen jedes noch das Ganze machen konnte. Die Furchungszellen sind dagegen die Arbeiter im Massenbetriebe. Jede von ihnen hat im typischen Entwickelungsverlauf ihre anfängliche Totalpotenz nur für eine bestimmte Leistung eingestellt, kann aber bei atypischer Entwickelung eventuell noch eine andere Aufgabe übernehmen. Diese Darstellung des Rouxschen Standpunktes scheint dem Verfasser dieses Artikels den Tatsachen adäquater zu sein als Roux's eigene Fiktion von der qualitativ ungleichen

Digitized by Google

Teilung des aktivierten und der qualitativ gleichen des inaktiven Bildungsmaterials, welches bei Störungen des typischen Entwickelungsverlaufs in Aktion tritt und deshalb den Namen Reserveidioplasson erhielt.

2. Die Versuche an Echinodermen.

2a) Versuche an unbefruchteten Eiern. Wir hatten weiter vorn gesehen, daß man bei Strongylocentrotus bereits am ungefurchten und unbefruchteten reifen Ei verschiedene organbildende Keimbezirke deutlich erkennen kann, und es ist hiernach der Schluß berechtigt, daß auch die anderen Seeigeleier, welche keine pigmentierten Marken haben, die uns die verschiedenen Keimbezirke äußerlich erkennen lassen, doch dieselben auch auf dem Stadium des ungefurchten Eies schon in derselben Anordnung aufweisen wie das Strongylocentrotus-Ei. Es fragt sich also, ob tatsächlich schon am ungefurchten Ei bestimmte Regionen für bestimmte Leistungen determiniert sind oder ob das noch nicht der Fall ist? Die Antwort darauf geben die Resultate von Versuchen Boveris, die derselbe im Anschluß an Experimente der Brüder Hertwig, freilich zu ganz anderen Zwecken als zur Lösung der vorstehenden Frage, anstellte. Die letzteren beiden Forscher hatten im Jahre 1887 gefunden, daß man Echinodermeneier durch Schütteln in einem Reagenzröhrchen in kernhaltige und kernlose Stücke zersprengen kann, und daß beiderlei Stücke befruchtet werden und sich furchen können. Boveri stellte dann 1889 weiter fest, daß sich nicht nur die kernhaltigen, sondern auch die befruchteten kernlosen Eifragmente zu normalen kleinen Larven entwickeln können. Damit war wenigstens bewiesen worden, daß Teile des Seeigeleies fehlen können, ohne daß die Entstehung einer ganzen Larve unmöglich gemacht wird, daß also eine ins einzelne gehende unabänderliche Determinierung der Eiteile zu bestimmten Teilen des Embryos auf dem Stadium des ungefurchten und unbefruchteten reifen Eies noch nicht existiert. Wieweit die Totipotenz der Eiteile geht, ob sie jedem beliebigen Teilstück zukommt oder nicht, das ist aus diesen ersten Versuchen Boveris noch nicht zu ersehen. Natürlich war durch dieselben außerdem keineswegs entschieden, daß auch die beiden ersten Furchungszellen, wenn man sie isoliert, nicht Halbbildungen, sondern ganze Individuen aus sich hervorgehen lassen, denn die Determinierung konnte ja, wie anscheinend beim Frosche, mit der ersten Furchung einsetzen.

2b) Die Versuche Driesch's an Zwei- und Vierzellenstadien. Durch diese Versuche kam man einen Schritt weiter vorwärts. Driesch benutzte zu seinen ersten Versuchen aus den Jahren 1891 und 1892 zunächst auch die Hertwigsche Schüttelmethode. Es wurden also bei Seeigeleiern die beiden ersten Furchungszellen durch Schütteln voneinander getrennt und das Schicksal der isolierten Zellen weiter verfolgt. Dabei stellte sich heraus, daß die weitere Furchung so verlief, wie sie verlaufen wäre, wenn die Zelle im Verbande mit der anderen geblieben wäre. Die Furchung war also halb, und auf dem 16-Zellenstadium waren somit an Stelle von vier nur zwei Mikromeren und zwei Makromeren vorhanden. Diese Halbheit der Furchung trat auch dann hervor, wenn der Furchungszellenkomplex gleich von Anfang an infolge Gleitens der Zellen geschlossen war und nicht erst eine offene Hohlkugel bildete, die sich vor der Blastulabildung durch Gleiten der Zellen zu einer vollständigen Kugel schloß. Während der Furchung des Eies findet keine sichtbare Differenzierung statt. Das erste Stadium, welches im Gegensatz zum Ei und seinen Teilprodukten eine weitergehende Differenzierung aufweist, ist das Blastulastadium, und dieses war bei den Keimen, die sich aus einer Zelle des Zweizellenstadiums entwickelt hatten, nicht halb, sondern ganz. Aus ihr entstand eine ganze kleine Gastrula und schließlich ein ganzer kleiner Pluteus. Wurden die Zellen des 4-Zellenstadiums durch Schütteln voneinander getrennt, so ergab sich im Prinzip dasselbe Resultat: Die isolierte Zelle furchte sich so, wie sie sich im Verbande gefurcht haben würde, das erste Stadium, welches eine weitere Differenzierungsstufe als das Ei aufwies, die Blastula, war aber wie die folgenden Larvenstadien ganz, und es konnten so aus den Vierteln kleine Plutei mit Skelett und dreigliedrigem Darm hervorgehen, deren Fortsätze allerdings kurz blieben. Driesch war also zu einem Resultat gelangt, das dem Rouxschen im wesentlichen entgegengesetzt war. Es entstanden aus isolierten Blastomeren des Zwei- und Vierzellenstadiums nicht halbe und viertel Embryonen, sondern ganze von halber resp. viertel Größe. Zellen der ersten beiden Furchungsstadien, die sich im Verbande mit den anderen zu Teilen eines Organismus ausbilden, liefern getrennt den ganzen Organismus in reduzierter Größe, das ist die allgemeine Formulierung dieser grundlegenden Versuchsergebnisse.

2c) Gegenüberstellung der Auslegung der Drieschschen Resultate durch Driesch selbst und durch Roux. Wir müssen uns daran erinnern, daß der Zweck der geschilderten Experimente der war, festzustellen, ob bereits auf den ersten Furchungsstadien bestimmte Zellen zu bestimmten Teilen des Embryos determiniert sind oder ob dies noch nicht der Fall ist. Driesch's Antwort ist darauf, daß die zwei, ja sogar vier ersten Zellen des Echiniden-Eies

Digitized by Google

dieselbe Potenz besitzen, die in diesem Falle noch mit der des ganzen Eies identisch ist. Systeme, deren einzelne Elemente die gleiche Potenz besitzen, nennt Driesch äquipotentielle Systeme. Die 2- und 4-Zellenstadien der Seeigeleier sind also solche. Von einer unabänderlichen Determinierung der einzelnen Zellen dieser Stadien zu bestimmten Teilen des Embryos kann deshalb nicht die Rede sein. Wie stellt sich nun aber Driesch zu der Tatsache der Teilfurchung der isolierten Furchungszellen? Er sieht darin nicht den Ausdruck einer bereits beschränkten Potenz derselben, sondern meint, daß die Halb- resp. Viertelfurchung überhaupt keine Frage der Potenz, sondern des Baues, der Architektur des Eies sei. Die Architektur einer isolierten Blastomere sei zunächst halb oder viertel, ordne sich aber dann zur ganzen Form durch Verlagerung der kleinsten bilateralen Teilchen der Zellen um. So folge auf die Halb- resp. Viertelfurchung die Ganzentwickelung.

Im Gegensatz hierzu bestreitet Roux, daß die Teilfurchung der isolierten Furchungszellen nur eine Frage des Eibaues und nicht der Potenz wäre. Er sagt, die Teilfurchung zeige, daß bei der typischen Entwickelung die Potenzen der Zellen schon in bestimmter Weise eingestellt sind, wenn sie auch noch nicht eine unabänderliche Beschränkung erfahren haben. Die vier ersten Blastomeren wären hiernach vier Uhrmachern zu vergleichen, welche von Haus aus zwar jeder für sich eine vollständige Uhr machen können, sich aber in die Herstellung derselben so geteilt haben, daß jeder nur einen bestimmten Teil fabriziert. Trotz dieser Einstellung der Gesamtpotenz auf eine bestimmte Leistung während des typischen Fabrikationsverlaufes kann aber jeder für sich, wenn die vier ihr Zusammenarbeiten wieder aufgegeben haben, auch eine ganze Uhr fertig bringen. Man sieht hieraus, daß die Fragestellung Roux's eine kompliziertere, wenn vielleicht auch eine vollständigere als die Driesch's ist. Letzterer faßt nämlich nur die unabänderliche Determinierung der Eiteile ins Auge, weil er meint, man könne mit Sicherheit nur die Gesamtpotenz, nicht aber die auf einen bestimmten Punkt eingestellte Potenz der Blastomeren eruieren. Roux dagegen will auch die noch abänderungsfähige Determinierung der Zellen ermitteln. Das geht natürlich nur dann, wenn die Zelle nach ihrer Isolation zunächst noch die ihr zugefallene Teilaufgabe weiterführt und erst nach einiger Zeit auf die Herstellung des Ganzen hinarbeitet. In einem solchen Falle muß man die Berechtigung des Schlusses zugestehen, daß die betreffende Zelle im normalen Entwickelungsverlauf bereits zu einer bestimmten Leistung determiniert war, allerdings in noch abänderungsfähiger, nicht unabänderlicher Art und Weise. Die Roux-sche Auslegung der bei den Echiniden gefundenen Tatsachen stützt sich demnach auf die Teilfurchung der isolierten Blastomeren des Seeigeleies, sie hat aber außerdem zur Voraussetzung, daß die Ganz- oder Teilfurchung zugleich auch etwas über die Ganzheit oder Defektheit der auf die Furchung folgenden Embryonalentwickelung aussagt. Gilt diese Voraussetzung nicht, so würde natürlich eine Halbfurchung nicht zeigen, daß die betreffende Zelle schon potentiell zur Lieferung einer Hälfte des eigentlichen Embryos eingestellt ist. Wir werden später noch einmal auf diese wichtige Frage zurückkommen und sehen, in welchem Sinne sie von den vorliegenden Tatsachen entschieden wird.

2d) Die verschiedenen Methoden zur Trennung der Furchungszellen bei den Echiniden. Abgesehen vom Schütteln ist es noch mit folgenden Methoden gelungen, die ersten Furchungszellen der Seeigeleier voneinander zu trennen oder eine oder mehrere von ihnen bei Ueberleben der anderen abzutöten:

α) Wärme. Im Jahre 1892 fand Driesch, daß befruchtete Sphaerechinus-Eier, wenn man sie bis zum Ablauf der Furchung einer Temperatur von 31° C aussetzt und dann in Zimmertemperatur zurückbringt, in einem gewissen Prozentsatz mehr als eine Larve aus sich hervorgehen lassen. Meist sind es Zwillinge, nur sehr selten erhielt er Vierlinge, und kleinere Teillarven kamen überhaupt nicht zur Beobachtung.

β) Verdünntes Seewasser. Verdünntes Seewasser wurde ebenfalls von Driesch (1893) zum ersten Male zum Trennen der Zellen des Eies von Echinus microtuberculatus benutzt. Werden dieselben nach der Befruchtung in 70 Teile Seewasser + 30 Teile Süßwasser gebracht, so können Zwillinge, Vierlinge oder auch ein $^1/_2$-Holoembryo und zwei $^1/_4$-Holoembryonen gleichzeitig aus einem Eie entstehen. Bleiben die Keime in der verdünnten Lösung, so kommen sie über das Blastulastadium nicht hinaus, werden sie dagegen in eine konzentriertere Lösung zurückgebracht, so können sie sich bis zu Pluteis entwickeln. In anderer Weise verwendete 1895 Jacques Loeb verdünntes Seewasser bei der in Woods Holl vorkommenden Arbaciaform. Er brachte die Eier 10 bis 20 Minuten nach der Befruchtung in verdünntes Seewasser, das durch Zusatz von 100% destillierten Wassers zu gewöhnlichem Seewasser hergestellt wurde. Infolge des Ueberdruckes im Innern platzte die Dottermembran und ein Teil des Inhaltes trat heraus, ohne sich vollständig von dem Intraovat abzugliedern. Die Eier blieben gewöhnlich zwei Stunden in dem verdünnten Medium und wurden

Digitized by Google

darauf wieder in normales Seewasser zurückgebracht. Die erste Furchungsebene stand im allgemeinen senkrecht auf dem gemeinsamen Durchmesser der beiden Protoplasmakugeln, so daß also bei der ersten Kernteilung sowohl das Intra- wie das Extraovat bekernt wurde. Aus diesen Eiern mit Extraovat können schließlich Doppelblastulae oder langgestreckte Blastulae mit einer Einschnürung hervorgehen. Diese Loebsche Extraovatmethode hat aber eine sehr geringe Bedeutung, da es nur bei der Arbaciaform in Woods Holl nicht zu einer vollständigen Abschnürung des Extraovates kommt.

γ) Veränderung der Zusammensetzung des Meerwassers durch Zusatz gewisser Salze. Diese Methode kann ebenfalls, wie Herbst 1892 fand, die Entstehung von einer oder mehreren kleinen ganzen Teillarven aus einem Ei herbeiführen. So beobachtete er z. B. in zwei Kulturen, welche beide mit einem Gemisch von vier Teilen Seewasser und 1 Teil 3prozentiger KCl-Lösung angesetzt worden waren, in einer Anzahl Eihüllen zwei ganze kleine Blastulae. In einem anderen Seewassergemisch, das auf 1 Liter Seewasser 6 g KBr enthielt, wurde ein größerer oder geringerer Teil des Furchungszellenmaterials der Eier abgetötet, während aus dem Rest kleine ganze Larven von verschiedener Größe hervorgingen. Derselbe Effekt konnte auch mit anderen Salzen, z. B. mit KJ, NaBr und $NaNO_3$ erzielt werden. Dabei kam es auch vor, daß zwei oder mehrere kleine Blastulae aus einem Ei hervorgehen konnten. Auch bei künstlicher Parthenogenese, die mit $MgCl_2$-Zusatz oder mittels einer Fettsäure eingeleitet wurde, kommt es nach Loebs und Herbsts Angaben oft zur Entstehung von mehr als einem Keim aus einem Ei.

δ) Veränderung der Zusammensetzung des Meerwassers durch Fortlassen von Salzen. Auch dieses Verfahren ist zur Züchtung von mehr als einer Ganzlarve aus einem Ei geeignet. So berichtete erst jüngst Loeb über Versuche mit Lösungen, denen eines oder zwei der drei Metalle Na, K und Ca, die als Chloride zur Verwendung kamen, fehlte. Das Versuchsmaterial waren die Eier des californischen Seeigels Strongylocentrotus purpuratus. Die befruchteten Eier kamen ungefurcht in die Lösung, in der sie bis über die Zweiteilung hinaus blieben. Dann wurden sie wieder in normales Seewasser zurückgebracht. So erhielt er z. B. in einer Lösung, die NaCl und KCl enthielt, nach 3stündiger Expositionsdauer 90% Zwillinge, in einer anderen, die NaCl und $CaCl_2$ enthielt, nach der gleichen Expositionsdauer ebenfalls 90% Zwillinge, während mit einer dritten Lösung, die aus allen drei Salzen bestand, nach gleichlanger Expositionsdauer nur 5%, in anderen ähnlichen Versuchslösungen sogar gar keine Zwillinge erhalten wurden. Zur Erzielung positiver Resultate ist außerdem notwendig, daß die Lösungen keinen Ueberschuß der Hydroxylionen über die Wasserstoffionen aufweisen, da sonst die Zwillingsbildung absolut gehemmt wird, wie durch Zusatz geringer Mengen von $NaHCO_3$ oder NaOH bewiesen werden konnte.

Die Experimente von Loeb, welche mit Lösungen angestellt wurden, in denen wohl Na und K, aber kein Ca war, berühren sich eng mit den schon lange vorher von Herbst angestellten Versuchen über das Auseinandergehen von Furchungszellen im kalkfreien Medium. Das Herbstsche kalkfreie Seewasser ist allen anderen Mitteln, mit denen die Trennung von Furchungszellen gelungen ist, bei weitem überlegen. Notwendig ist nur, daß man die Dottermembran der Eier gleich nach der Befruchtung durch Schütteln entfernt, da sonst die im kalkfreien Wasser getrennten Furchungszellen nach dem Zurückbringen der Eier in kalkhaltiges Wasser leicht wieder zusammen gehen können. Um also aus einem Ei zwei Individuen zu züchten, verfährt man so, daß man die der Dotterhaut beraubten Eier in kalkfreiem Seewasser sich in zwei Zellen furchen läßt. Man wird dabei bemerken, daß die beiden Tochterzellen nach der Durchschnürung nicht beieinander liegen bleiben, sondern sich vollständig voneinander trennen, so daß die typischen Ruhestadien der in zwei geteilten Eier mit zwei eng aneinander gepreßten Zellen gar nicht vorkommen. Gießt man nun, nachdem die Zweiteilung vollendet ist, das kalkfreie Seewasser ab und ersetzt es wieder durch kalkhaltiges, so furchen sich die beiden isolierten Zellen jedes Eies weiter, es bleiben aber nunmehr die Teilungsprodukte beieinander liegen und bilden einen geschlossenen Haufen, so daß schließlich zwei ganze kleine Blastulae und schließlich zwei ganze kleine Plutei aus einem Ei entstehen. Läßt man die Eier bis zum 4-Zellenstadium in der kalkfreien Lösung und bringt sie erst dann in normales Seewasser zurück, so erhält man vier ganze Embryonen aus einem Ei, läßt man sie bis zum 8-Zellenstadium darin, 8 kleine Embryonen usw. Ja, man bringt die Furchungszellen irgendeines Stadiums sogar zum Auseinanderfallen, wenn man sie sich erst in gewöhnlichem Seewasser entwickeln läßt und erst auf dem gewünschten Stadium in die kalkfreie Mischung überführt. Daß die Trennung der Zellen auf jedem beliebigen Stadium und nicht nur auf den Anfangsstadien herbeigeführt werden kann, das ist der große Vorzug, den die Methode mit kalkfreiem Seewasser bietet. Sie ist übrigens mit Erfolg nicht nur bei den Echiniden, sondern von E. B. Wilson auch am Molluskenei ange-

Digitized by Google

wandt worden. Driesch hat bei seinen späteren Isolationsversuchen vom Jahre 1900 ab immer kalkfreies Seewasser benutzt, und der große Fortschritt in unserer Kenntnis, den er mittels dieser Methode erzielt hat, ist ein deutlicher Beweis für die Brauchbarkeit der letzteren.

2e) Die Trennung von Zellen des 8-Zellenstadiums des Seeigeleies. Diese Trennung ist deswegen so wichtig, weil nach den Resultaten der deskriptiven Forschung, die wir oben kennen lernten, durch die erste äquatoriale Furchung das Material, welches nur Ektoderm liefert, von jenem getrennt wird, welches größtenteils Meso- und Entoderm, d. h. das primäre und sekundäre Mesenchym, die Anlage der Leibeshöhle und des Ambulacralgefäßsystems und den Darm aus sich hervorgehen läßt. Die Isolationsversuche mit vegetativen und animalen Zellen des Achtzellenstadiums führten nun Driesch zwar zu dem Resultat, daß aus beiderlei Zellsorten noch vollständige Gastrulae entstehen können, daß aber trotzdem auch augenfällige Unterschiede zwischen beiden Zellsorten bestehen, wie beistehende Tabelle zeigt:

	Tot oder krank	Bis zur Blastula	Bis zur Gastrula
Sphaerechinus:			
Vegetative Zellen . .	42	—	35
Animale Zellen . . .	—	71	35
Echinus:			
Vegetative Zellen . .	69	—	23+8[1])
Animale Zellen . . .	—	91	17+2[1])

Die Tabelle beweist also zunächst die Richtigkeit der bereits gemachten Angabe, daß Gastrulae sowohl aus vegetativen, wie aus animalen Zellen des Achtzellenstadiums entstehen können, sie zeigt aber auch, daß von den vegetativen Zellen zwar viele starben, daß aber alle überlebenden das Gastrulastadium erreichten, während von den animalen Zellen keine starben, aber nur ein kleiner Teil bis zum Gastrulastadium kam. Die übrigen überschritten das Blastulastadium trotz ihrer Langlebigkeit nicht. Sie wiesen an einem sehr großen Teil ihrer Oberfläche sehr lange und starre Wimpern auf, wie sie normalerweise am animalen Pole einer jeden Blastula und Gastrula vorkommen. Derartige Achterzellen waren also in der Tat in ihrer Entwickelungspotenz im Vergleich zu den Zellen des Viererstadiums beschränkt, sie bildeten das, was in der Norm aus ihnen hervorgeht, wenn auch ihre Wandung keinen Teil einer Kugeloberfläche ausmachte, sondern eine geschlossene Kugel bildete. Bei den anderen Achterzellen, die sich über das Blastulastadium hinausentwickelten, kann man dagegen noch nicht von einer unabänderlichen Determinierung zu bestimmten Teilen des Embryos sprechen, denn ein Teil dieser kleinen Gastrulae, deren Darm sich allerdings nur in zwei Abschnitte gliederte, besaß sogar primäres Mesenchym. Das ist noch bemerkenswerter als die Entstehung eines Darmes aus Zellen, die nach der deskriptiven Forschung gar kein darmbildendes Material mehr besitzen, weil die primären Mesenchymzellen, die Skelettbildner, aus Teilen des Eies hervorgehen, die noch weiter von den vier animalen Zellen des Achtzellenstadiums entfernt liegen als die darmbildenden Bezirke. Trotz der näheren Lage der letzteren greifen dieselben aber doch nicht auf die animale Hälfte des Eies oder der Furchungsstadien über, denn es ist ganz sicher, daß nicht etwas mehr als die Hälfte des Zellenmaterials der Blastula in das Innere gelangt, sondern höchstens die Hälfte, höchst wahrscheinlich sogar weniger als die Hälfte, wenn vielleicht auch die Zahlen $^1/_8$ bis $^1/_4$, zu denen man durch Zählen der Kerne gelangt, deswegen zu niedrig gegriffen sind, weil man, wie H. Schmidt richtig bemerkt, dabei voraussetzt, daß zu allen Kernen auch immer die gleiche Plasmamenge gehört. Es ist demnach absolut sicher, daß bei den isolierten animalen Zellen des Achterstadiums, falls es überhaupt zur Entwickelung über die Blastula hinauskommt, die Mesenchym- und Darmbildung von Bezirken ausgeht, die sonst Ektoderm gebildet hätten. Das Ektoderm der Gastrulae mit dreigliederigem Darm, welche aus den isolierten vegetativen Zellen hervorgehen, kann dagegen wenigstens zum Teil aus ektodermbildenden Keimbezirken hervorgegangen sein, ganz aber auch nicht, da die Larven sonst ganz abnorm gestaltet und in einer zu kleinen Haut einen zu großen Darm besitzen müßten, was nicht der Fall ist. Also hat auch bei den vegetativen Zellen des Achterstadiums eine andere Verwendung des Eimaterials stattgefunden.

2f) Die Trennung von Zellen des 16-Zellenstadiums des Seeigeleies. *α*) Das Wegbringen der Mikromeren. Wir hatten im deskriptiven Teil gesehen, daß aus den Mikromeren die Skelettbildner hervorgehen. Es fragt sich demnach, ob das Skelett der Larve in Wegfall kommt, wenn die Mikromeren entfernt werden. Die Antwort lautet: Nein, es entstehen trotzdem Plutei mit Skelett.

[1]) Der letzte der beiden Summanden bezeichnet die Anzahl der Larven, bei denen der Urdarm statt nach innen, nach außen angelegt war.

Digitized by Google

β) Die Entwickelung isolierter Mikromeren. Die Entwickelung geht bis zu einem kleinen wimpernden Keim vor sich, der aber wegen der zu geringen Zellenzahl — eine Mikromere liefert nur noch 10 Zellen — zu einer weiteren Differenzierung nicht fähig ist. Nach Driesch's Berechnung repräsentiert eine Mikromere des 16-Zellenstadiums nur $^1/_{80}$ vom Volumen des Gesamteies.

γ) Die isolierten Makromeren. Sie repräsentieren im Gegensatz zu den Mikromeren mehr als $^1/_{16}$, nach Driesch's Angaben nämlich etwa $^1/_9$ des ganzen Eies. Die Entwickelung derselben ist deswegen von Interesse, weil sie nach Boveris deskriptiven Befunden im wesentlichen nur sekundäres Mesenchym, die Cölomsäcke und den Darm liefern. Trotz alledem sehen wir in beistehender Figur 16

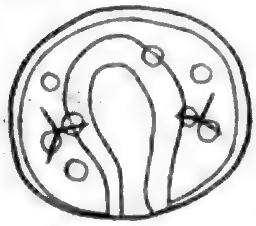


Fig. 16. Echinus-Gastrula aus einer Makromere des 16-Zellenstadiums. Nach Driesch.

eine kleine Gastrula vor uns, welche aus Ektoderm, Urdarm und primärem Mesenchym besteht, dessen Zellen sogar zwei kleine Kalknadeln in Form von Dreistrahlern gebildet haben, obwohl, wie auch schon in Experiment α die Zellen, welche in der Norm das Skelett bilden, nicht vorhanden waren.

δ) Die isolierten 8 Zellen des animalen Poles des 16-Zellenstadiums. Sie repräsentieren im Gegensatz zu den vegetativen Zellen wirklich ungefähr $^1/_{16}$ des ganzen Eies. Ihr Verhalten ist ähnlich wie das der isolierten animalen Zellen des Achterstadiums, d. h. sie sind nur noch zum kleinen Teil imstande zu gastrulieren, zum größten Teil entwickeln sie sich nur zu langwimperigen, ruhenden Blastulis. Figur 17 gibt die verschiedenen Larventypen, die aus isolierten animalen Zellen des 16-Zellenstadiums von Echinus entstehen können, wieder. Wir finden darunter (A) kleine Gastrulae mit primärem Mesenchym und kleinen Dreistrahlern, dann (B) ebensolche Gastrulae aber ohne Kalknadeln, weiter kleine Gastrulae ohne Mesenchym und endlich die typischen langwimperigen, ruhenden Blastulae mit einem dichten Besatz starrer Wimpern an einer Seite. Unter 139 isolierten Objekten kamen 103 solcher Blastulae vor. Der Umstand aber, daß trotz des Ueberwiegens der letzteren doch noch Gastrulae aus den isolierten animalen Zellen entstehen können, beweist zur Genüge, daß die Ektodermzellen, trotzdem sie bereits bei der Achtteilung von der Ento-Mesodermanlage getrennt wurden, in einem gewissen Prozentsatz von Fällen selbst noch nach dem vierten Teilungsschritt fähig sind, auch noch andere Bildungen, als die, zu denen sie im typischen Falle berufen sind, aus sich hervorgehen zu lassen.

2g) Die untere Grenze der Gastrulation. Nachdem wir eben gesehen haben, daß eine Blastomere, welche $^1/_{16}$ des Volumens des ganzen Eies ausmacht, noch gastrulieren kann, ist es am zweckmäßigsten, gleich nach dem zur Gastrulation noch fähigen Keimesminimum zu fragen. Driesch hat darauf geantwortet, daß auch Blastomeren des animalen Teiles der 32-Zellenstadien unter Umständen noch gastrulieren und Mesenchym bilden können, daß aber bei Echinus-Eiern hier die Grenze zu liegen scheint. Diese untere Volumengrenze fand er auch bei Bruchstücken des ungefurchten Eies auf, sie beträgt also $^1/_{32}$ des Gesamteies.

2h) Bestimmt die Quantität der organbildenden Keimbezirke diejenige der daraus hervorgehenden Bildungen? Driesch hat diese wichtige Frage durch seine Experimente an Furchungsstadien mit Nein beantwortet. Zur Begründung dieser negativen Antwort kann er zweierlei Resultate anführen. Erstens:

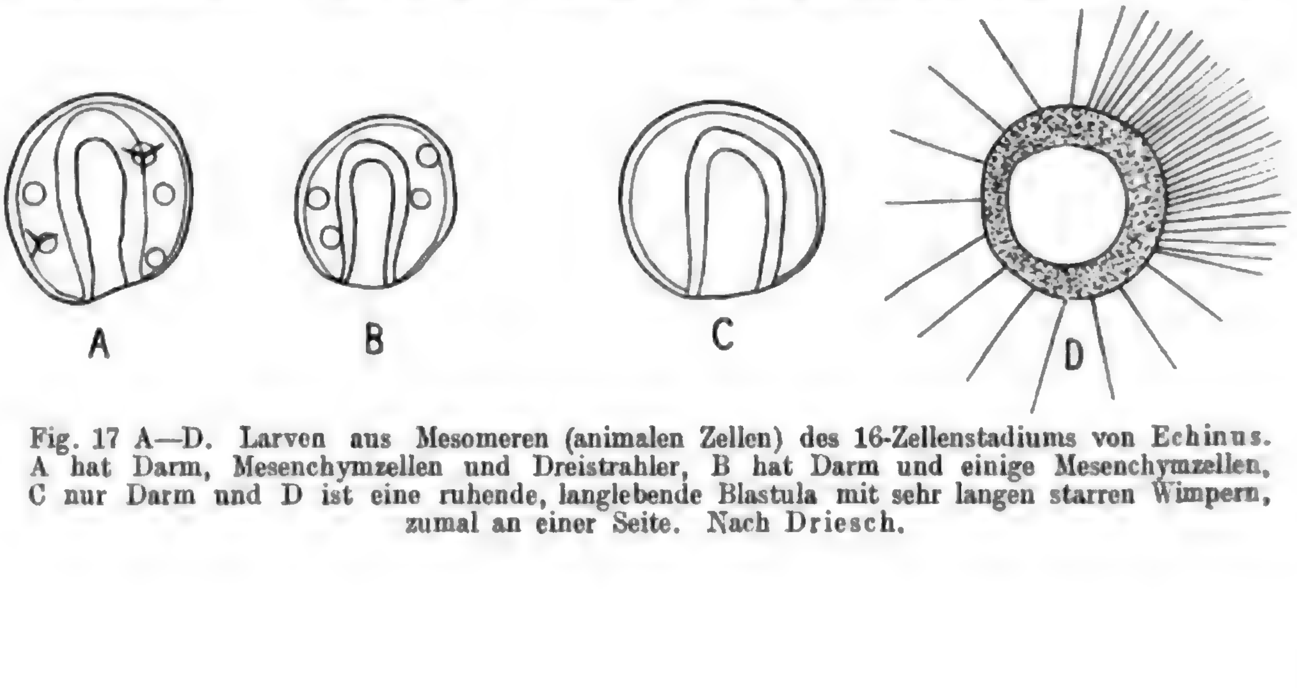


Fig. 17 A—D. Larven aus Mesomeren (animalen Zellen) des 16-Zellenstadiums von Echinus. A hat Darm, Mesenchymzellen und Dreistrahler, B hat Darm und einige Mesenchymzellen, C nur Darm und D ist eine ruhende, langlebende Blastula mit sehr langen starren Wimpern, zumal an einer Seite. Nach Driesch.

Digitized by Google

Wie man sich an den oben gegebenen Figuren (Fig. 3) überzeugen kann, erhält eine Zelle des 4-Zellenstadiums ebensoviel von dem Keimbezirk des primären Mesenchyms und des Entoderms wie eine der 4 vegetativen Zellen des Achtzellenstadiums. Trotzdem erhält die $^1/_8$-Larve nur ungefähr die Hälfte der primären Mesenchymzellen der $^1/_4$-Larve, und ist der Darm der ersteren ebenfalls kleiner als der Darm der letzteren. Zweitens: Stellt man sich aus 16-Zellenstadien mit Hilfe kalkfreien Wassers unharmonisch zusammengesetzte Bruchteile her, d. h. Stücke, welche eine nicht zueinander passende Anzahl von Mikro-, Makro- und Mesomeren aufweisen, so entstehen trotzdem normal gebaute Larven. So gehen z. B. aus Bruchstücken, welche aus vier Mikro-, vier Makro- und vier Mesomeren bestehen, welche also zwar das ganze skelett- und darmbildende Material, aber nur die Hälfte der Ektomeren enthalten, wohl proportionierte Plutei mit nicht zu großem Darm hervor. Das Gegenstück liefern Bruchteile, welche sich aus 1 Mikro-, 1 Makro- und 6 Mesomeren zusammensetzen, also verhältnismäßig zu wenig skelett- und darmbildendes Material und zu viel ektodermbildendes besitzen, aber trotzdem normal gebaute Plutei liefern. Es ist noch wichtig darauf hinzuweisen, daß unharmonisch zusammengesetzte Bruchstücke, welche im Verhältnis zu ihrer Größe zu wenig vom Mikromerenpol (nur 1 Mikromere) erhalten haben, relativ zu viel primäre Mesenchymzellen bekommen können, während es bei anderen Bruchteilen, die im Vergleich zu ihrer Gesamtgröße zuviel Substanz vom vegetativen Pol besitzen, gerade umgekehrt sein kann d. h. sie können relativ zu wenig primäre Mesenchymzellen erhalten. Es ist also nicht die Quantität des Ausgangsmaterials allein ausschlaggebend für die Quantität der daraus hervorgehenden Bildungen. Was ist aber dann für die letztere verantwortlich zu machen? Die Größe des ganzen Zellenkomplexes. Wieviel ein organbildender Keimbezirk an Organ wirklich zu liefern hat, bestimmt nicht er oder zum mindesten nicht er allein, sondern die Größe des Ganzen.

Diese Abhängigkeit der Größe eines Gebildes von der Größe des Ganzen hat auch E. B. Wilson bei seinen Versuchen mit Bruchstücken des unbefruchteten Eies von Dentalium erfahren. Wird der vegetative Teil mit der Dottersackbildungszone abgeschnitten und befruchtet, so bildet das Eibruchstück bei der Zweiteilung einen Dottersack in den richtigen Proportionen, obwohl es die gesamte Menge von Dottersackbildungssubstanz erhalten hat. Wir werden später auf diese Befunde E. B. Wilsons noch einmal zu sprechen kommen, wenn wir von dem Zeitpunkte der definitiven Fixierung des Eibaues sprechen werden.

2i) Die unvollständige Trennung von Furchungszellen und ihre Folgen. α) Die Trennung der Mikromeren in zwei Pakete. Da wir im deskriptiven Teil gesehen haben, daß der Ort der hellen vegetativen Polkappe auch der Entstehungsort des primären Mesenchyms ist, so ist interessant zu wissen, was nach Ausziehen des hellen vegetativen Polfeldes in zwei Portionen erfolgt? Befunde Boveris geben hierüber Aufschluß. Er hatte Eier von Strongylocentrotus senkrecht zur Längsachse gestreckt, so daß die helle vegetative Polkappe bisquitförmig eingeschnürt worden war. Die Folge davon war, daß das primäre Mesenchym in zwei Haufen auftrat, welche vollkommen der Konfiguration des deformierten hellen vegetativen Poles entsprachen. Boveri sagt zwar nichts über die Lage der Mikromeren im 16-Zellenstadium, da aber die Lage derselben von der Lage und Konfiguration des hellen Feldes am vegetativen Pole abhängig ist, so kann man annehmen, daß die Mikromeren und ihre Abkömmlinge ebenfalls in zwei Haufen wie die aus ihnen hervorgehenden primären Mesenchymzellen angeordnet waren. In einem anderen Falle, in dem das mesenchymbildende Feld ebenfalls senkrecht zur Eiachse ausgezogen worden war, und zwar so, daß einer größeren Partie ein schmaler Zipfel anhing, erhielt er neben einer Hauptgruppe von primären Mesenchymzellen eine kleine Nebengruppe von 5 bis 6 Zellen. Man kann daraus schließen, daß eine Trennung der Mikromeren in mehrere Pakete ohne gleichzeitige Trennung der dazu gehörigen Makromeren das Auftreten von Mesenchymzellen an mehreren Orten zur Folge hat.

β) Die Spaltung des ganzen vegetativen Zellenkomplexes in zwei oder mehrere Pakete. Da aus dem vegetativen Zellenmaterial abgesehen von den mesenchymatischen resp. mesodermalen Bildungen der Darm hervorgeht, so kann man aus Furchungsstadien, deren vegetative Hälfte gespalten ist, von vornherein die Entstehung von Larven mit zwei oder mehreren Därmen erwarten. Das ist nun in der Tat der Fall, wie die beiden Entdecker des polaren Baues des Echinideneies nachgewiesen haben. In nachstehender Figur 18A sind z. B. die 4 Makro- und 4 Mikromeren des 16-Zellenstadiums durch die Einwirkung kalkfreien Seewassers auf das 8-Zellenstadium in zwei Gruppen geteilt. Das Endresultat war die in Figur 18B schematisch abgebildete Larve mit zwei Därmen. Es muß jedoch betont werden, daß solche Larven mit doppelten Därmen nur dann entstehen, wenn die verlagerten vegetativen Zellen

Digitized by Google

auch wirklich an Ort und Stelle liegen bleiben und sich nicht etwa im weiteren Verlauf der Entwickelung wieder nähern oder gar aus dem Verband der übrigen durch Ausstoßung in das Blastocöl oder nach außen ausgeschaltet werden. Diese beiden letzteren Einschränkungen gelten übrigens nicht nur für das Auftreten von mehr als einem Darm

Fig. 18. A die Zellen der vegetativen Hälfte eines 16-Zellenstadiums von Echinus sind in 2 Partien getrennt. Resultat (B) eine Larve mit 2 Därmen. Nach Driesch.

nach Verlagerung der Makromeren, sondern selbstverständlich auch für das Auftreten mehrerer Mesenchymbildungsorte nach Trennung der Mikromeren in zwei oder mehr Gruppen.

γ) Ueber sekundäre Regulationen bei Larven mit einheitlichem Ektoderm, aber zwei Därmen. Driesch hat bei manchen Seesternlarven, die in einem einheitlichen Ektoderm dicht beieinander zwei Urdärme aufwiesen, sehr interessante Vorgänge beobachtet, welche die Umbildung der Larve mit doppeltem in eine solche mit einfachem Darme zur Folge hatten. Obwohl

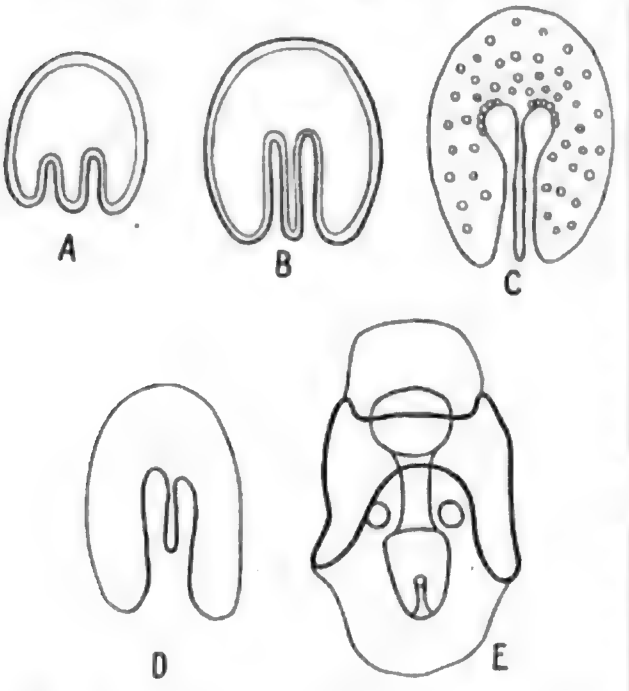


Fig. 19. A, B, C Stadien einer Asterias-Gastrula mit zwei parallelen Urdarmeinsenkungen, welche in D verschmelzen, so daß das Resultat eine normale Bipinnaria (E) ist. Nach Driesch.

diese Dinge nicht direkt in das Kapitel über die Trennung von Furchungszellen und ihre Folgen gehören, sollen sie doch gleichsam in Parenthese im Anschluß an die Entstehungsgeschichte der Larven mit doppeltem Darme geschildert werden. In Figur 19A haben wir eine Seesterngastrula mit zwei nahe beieinander liegenden Urdarmeinstülpungen vor uns. In Figur 19B sind dieselben länger geworden und in 19C sieht man, wie die freien Enden der beiden Därme zu dünnen Blasen geworden sind, aus deren Wand die Mesenchymzellen hervorgetreten sind und sich zum größten Teil auch schon im Blastocöl zerstreut haben. Anstatt daß nun aber jeder dünnwandige Endteil zwei Cölomsäcke gebildet hätte, sah man, daß die beiden Därme vom Blastoporus an zu verschmelzen begannen, so daß aus den beiden Därmen ein einheitlicher Darm entstand, der nunmehr in typischer Weise zwei Cölomsäcke bildete, von denen der eine mit dem Rückenporus nach außen mündete. Von einem abnormen Ausgangspunkt war also hier die Norm wieder hergestellt worden. Deswegen gehört dieser Prozeß unter die Regulationserscheinungen, und da er sich mit Hilfe von Faktoren vollzog, die in der deskriptiv-normalen Ontogenese nicht vorkommen — denn dabei wird nie das Verschmelzen von zwei ursprünglichen Därmen zu einem Darm konstatiert —, so spricht Driesch hier von sekundären Regulationen, denen die primären Regulationen gegenüberstehen, die sich mit Mitteln der normalen Ontogenese vollziehen.

δ) Die Entstehung von Verwachsungszwillingen. Erstreckt sich die Trennung der Blastomeren nicht nur auf den darmbildenden Bezirk, sondern auch auf den ektodermalen Teil, ohne freilich dessen Trennung in zwei Hälften vollständig herbeizuführen, so entstehen Verwachsungszwillinge mit doppelten entodermalen, meso- und ektodermalen Organen. Es ist Driesch gewesen, welcher den ersten Verwachsungszwilling experimentell hergestellt hat. In Figur 20A und B ist derselbe, in B schematisch und mit Skelett, wiedergegeben. Wie man sieht, sind die beiden Partner spiegelbildlich zueinander orientiert und zwar kehren sie sich in diesem Falle die Mundseiten zu. Das ist ein sehr merkwürdiges Vorkommnis, das einer eingehenderen Erörterung bedarf. Setzen wir nämlich voraus, daß die erste Furche in diesem Falle die Medianebene repräsentierte, so sollten eigentlich, falls die Symmetrieebenen der unvollständig voneinander getrennten Blastomeren die gleiche Orientierung beibehielten, die Medianebenen der beiden Partner einander und der Trennungsfläche, d. h. der ersten Furche parallel sein, wie dies Figur 21A zeigt. Das ist aber keineswegs der Fall. Beide Partner

Digitized by Google

haben vielmehr dieselbe Symmetrieebene, nur sind sie in derselben invers orientiert, so daß sie einander gleiche Flächen zukehren. Es haben sich also in diesem Falle die Symmetrieebenen der beiden Partner spiegelbildlich zueinander um 90° gedreht, so daß sie senkrecht auf der Symmetrieebene des ganzen Eies stehen. Wäre aber nicht die erste, sondern die zweite Furche die Symmetrieebene des Ganzen gewesen, so hätten die beiden Zwillinge eigentlich die in Figur 21 B abgebildete Stellung einnehmen müssen, d. h. beide hätten dieselbe Symmetrieebene wie die Larve von normaler Größe und wären auch gleichsinnig wie diese gerichtet. Der Vergleich von Figur 20 und 21 B ergibt nun aber, daß letzteres nicht stimmt. Es

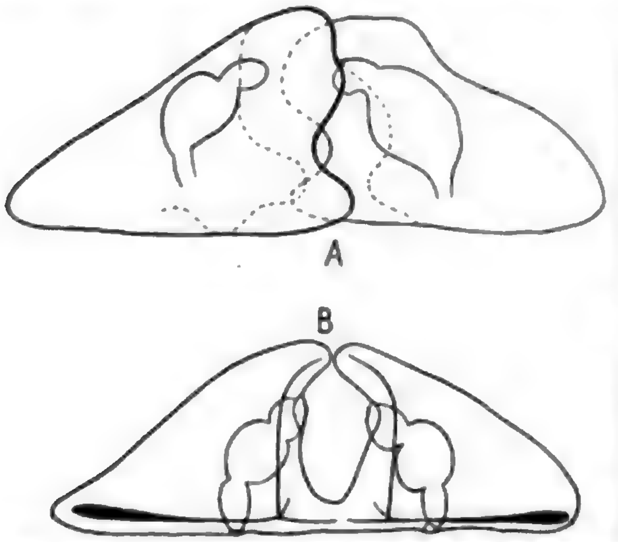


Fig. 20. A Verwachsungszwilling aus einem Echinus-Ei. Nach Driesch. Ohne Skelett, da nach einem gefärbten Präparat hergestellt. B Schema einer ähnlichen Larve mit Skelett. Die beiden Partner kehren einander die Mundflächen zu.

Fig. 21. Zeigt, wie bei Verwachsungszwillingen die beiden Partner zueinander orientiert sein müßten, wenn die erste Furche (A) oder die zweite Furche (B) der Medianebene entspräche, und keine Verdrehung der letzteren in den Partnern stattfände.

müßte sich also, falls die zweite Furche die Symmetrieebene des Ganzkeimes geworden wäre, die Mediane des einen Partners um 180° gedreht haben. Um eine Verdrehung der Medianebenen kommt man demnach in keinem Falle herum. Es scheint nun nicht unbedingt notwendig zu sein, daß die beiden Partner immer so spiegelbildlich zueinander orientiert sind, daß sie einander die Mundseiten zukehren, es scheint vielmehr auch vorzukommen, daß sie mit dem Scheitelteil verwachsen sein können, wie dies beistehende Doppelgastrula nach Driesch lehrt (Fig. 22).

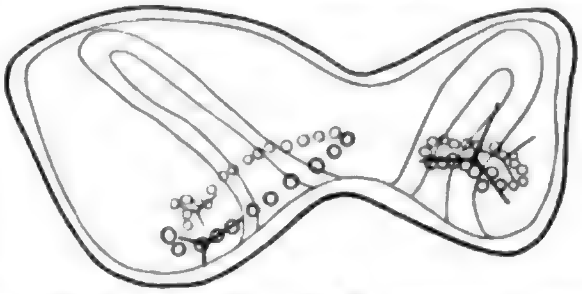


Fig. 22. Mit dem Scheitelteil zusammenhängende Gastrulae aus einem Echinus-Ei. Nach Driesch.

Man erkennt an der Lage der Dreistrahler, daß hier die künftigen Mundflächen voneinander abgewandt sein werden.

Viel häufiger als diese beiden Arten der Verwachsung sind aber nach Driesch jene Fälle, wo sich die beiden Partner den Blastoporus, also den After, zukehren. Solche Larven, von denen ein Zwillingspaar in Figur 23 wiedergegeben ist, machen zunächst

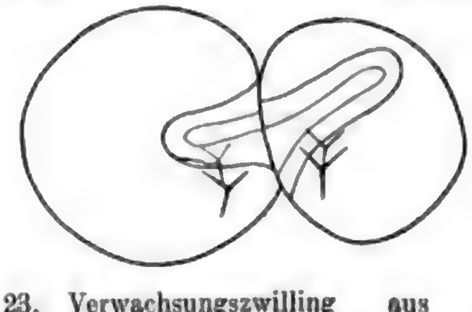


Fig. 23. Verwachsungszwilling aus einem Echinus-Ei, bei dem die beiden Partner sich die Analseiten zukehren. Nach Driesch.

einen höchst sonderbaren Eindruck auf den Beobachter, da es ganz den Anschein hat, als ob die primäre Eiachse, die doch in die animal-vegetative Achse der Gastrula übergeht, in diesen Fällen um 90° verlagert wäre, denn man sieht sie senkrecht auf der Trennungsebene der beiden Partner stehen, und diese sollte natürlich als erste Furchungsebene die primäre Eiachse einschließen. Man könnte infolgedessen vielleicht auf den Gedanken kommen, daß bei den eigenartigen Verwachsungszwillingen Zellen, die eigentlich die Seiten hätten bilden sollen, in Wirk-

Digitized by Google

lichkeit die Pole, und jene, welche die Pole der Gastrula hätten liefern sollen, tatsächlich die Seiten gebildet haben. Eine einfache Ueberlegung ergibt aber, daß diese Schlußfolgerung nicht ganz richtig ist: Wir hatten früher gesehen, daß die Furchung einer isolierten Blastomere typisch halb ist. Das gilt stets für die Zahl und die Art der auftretenden Furchungszellen, während die Anordnung derselben Schwankungen unterliegen kann. Recht häufig ist nun aber diese Anordnung, namentlich bei Echinus, auch typisch halb, d. h. es bilden die Furchungszellen, bevor sie sich zum Blastulaepithel differenzieren, zunächst eine offene Halbkugel, wie Figur 24a

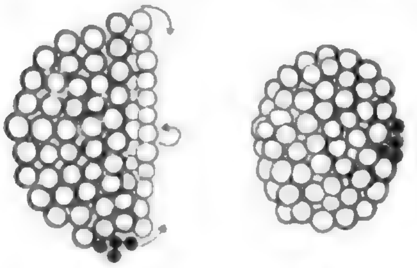


Fig. 24. Erklärung der Entstehung der mit den Analseiten verwachsenen Zwillinge. Die Zellen des Mikromerenpols sind kleiner und schwarz gezeichnet. Schematisch. Nach Driesch.

schematisch erkennen läßt. Wenn nun der Schluß dieser offenen Hohlkugel von allen Seiten gleichzeitig erfolgt, so werden die Mikromeren und die ihnen benachbarten Zellen nach der Mitte hin verlagert werden. Das geschieht in beiden Partnern in gleicher Weise, so daß also die Vegetativpolanteile der beiden ursprünglichen Hohlkugeln ungefähr in der Mitte der ersten Furchungsebene einander gegenüber zu liegen kommen. Die Verwachsung der beiden Partner dürfte in diesen Fällen wohl immer eine sekundäre sein. Da dieselbe durch Darmteile geschieht, so kann es deswegen und wegen der Schwimmbewegungen der beiden Larven entweder bei dem einen oder bei beiden Partnern zu einer ganzen oder teilweisen Ausstülpung des Darmes nach außen kommen.

2k) Die Entwickelungsgeschwindigkeit isolierter Furchungszellen. Vergleicht man die Furchungsgeschwindigkeit isolierter Furchungszellen mit derjenigen ganzer Eier, so ergibt sich kein Unterschied. Ein solcher macht sich jedoch deutlich bemerkbar, nachdem das Blastulastadium erreicht ist. Dann geht die Entwickelung der Keime aus isolierten Furchungszellen langsamer vor sich als die der Larven aus ganzen Eiern. Die Entwickelungsgeschwindigkeit nimmt ab mit dem Keimwert, wobei unter Keimwert die Zahl verstanden wird, die angibt, welchen Bruchteil des ganzen Eies die isolierte Zelle ausmacht.

2l) Die Zahl der Zellen der kleinen Ganzlarven (Mikroholoblasten). Die Frage, ob sich die Mikroholoblasten aus isolierten Furchungszellen oder Eibruchstücken durch ihre Zellenzahl oder durch ihre Zellengröße von den Larven aus ganzen Eiern unterscheiden, ist in mehrfacher Hinsicht von außerordentlicher Bedeutung geworden. Driesch hat diese Frage an den Darm- und primären Mesenchymzellen dahin beantwortet, daß die Größe dieser Zellen bei den Larven aus ganzen Eiern, aus isolierten Furchungskugeln des Zweizellen- und aus solchen des Vierzellenstadiums dieselbe ist, daß aber die Zahl der Zellen der beiden letzteren Larvensorten $1/2$ resp. $1/4$ der normalen Zellenzahl ist. Driesch hat außerdem die Zellenzahl im Urdarm von Seesterngastrulis aus Furchungszellen des 2-Zellenstadiums und aus ganzen Eiern festgestellt und auch hier bei den ersteren die Hälfte der Normalzahl aufgefunden. Dasselbe Resultat erhält man, wenn man Larven aus großen und aus kleinen Eiern miteinander vergleicht. Die Individuen aus großen Eiern haben nicht größere, sondern mehr Zellen als die aus kleinen. Dieser Satz von der konstanten Zellengröße tritt sogar bei Vergleich von zwei Seeigelgattungen hervor. Das Ei von Sphaerechinus granularis ist halb so groß wie das von Echinus microtuberculatus, und es ist die Zahl der Organzellen bei einer Echinuslarve ungefähr doppelt so groß wie bei einer gleichaltrigen Sphaerechinuslarve.

Die Bedeutung der Tatsache, daß nicht die Zellengröße, sondern die Zellenzahl dem Keimwert proportional ist, besteht nun einmal darin, daß damit nachgewiesen ist, daß die Entstehung von ganzen Larven aus isolierten Furchungszellen oder Bruchteilen des ungefurchten Eies nicht durch Zellenvermehrung, also durch Regeneration durch Sprossung neuen Zellenmaterials, sondern durch Andersverwendung des vorhandenen zustande kommt. Außerdem ist aber der Drieschsche Satz von der fixierten Zellengröße und variablen Zellenzahl bei verschieden großen Individuen der Ausgangspunkt für den Satz von der fixierten Kernplasmarelation geworden, die in einem späteren Abschnitt besprochen werden soll.

2m) Die relative Größe der Mikroholoblasten und der Satz von der fixierten Zellenform. Die Volumina der isolierten Blastomeren des Zwei-, Vier- und Achtzellenstadiums repräsentieren natürlich $1/2$, $1/4$ oder $1/8$ vom Gesamtvolumen des Eies, wenn aber aus den Furchungszellenhaufen geschlossene Hohlkugeln entstehen, dann liegen die Verhältnisse ganz anders, wie beistehende Figur 25 erkennen läßt, welche die Größen der $1/1$-, $1/2$-, $1/4$- und $1/8$-Blastula

ineinander gezeichnet wiedergibt. Berechnet man mit Hilfe der Durchmesser die Volumina der verschiedenen Blastulasorten, so stellt sich heraus, daß das Volumen der Blastulae aus isolierten Zellen des 2-Zellenstadiums weniger als $^1/_3$, das der $^1/_4$-Blastulae genau $^1/_8$ und das der $^1/_8$-Blastulae etwa $^1/_{20}$ der normalen Blastulagröße repräsentiert. Die allgemeine Formel für die Volumina der kleinen Ganzkeime ist nach Driesch: $v_n = \frac{V}{\sqrt{n^3}}$. Hierbei bezeichnet V das Volumen des Großkeimes, v das des Kleinkeimes und n den reziproken Wert des Keimwertes des letzteren. Es ist also das Volumen

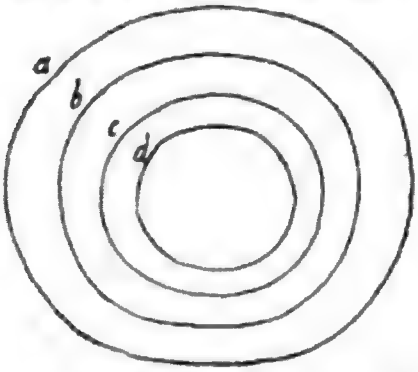


Fig. 25. a Umriß der $^1/_1$-, b der ½-, c der $^1/_4$-, und d der $^1/_8$-Blastula von Sphaerechinus. Nach Driesch. Aus Korschelt u. Heider.

eines Kleinkeimes gleich dem Volumen des Großkeimes dividiert durch die Wurzel der dritten Potenz der Größe n.

Wenn somit die Volumina den Keimwerten nicht proportional sind, da fragt es sich weiter, was nun eigentlich mit den letzteren übereinstimmt. Die Berechnung ergibt, daß dies die Oberflächen der Keime sind. In bezug auf sie sind also die Teilkeime $^1/_2$, $^1/_4$, $^1/_8$ usw. von den normalen Ganzkeimen. Ganz ähnliche Resultate hat Driesch auch bei den Messungen späterer Entwickelungsstadien erhalten.

Driesch hat nun an die von ihm aufgedeckte Tatsache des Sichentsprechens von Keimwert und Keimoberfläche noch eine recht wichtige Ueberlegung angeknüpft. Er sagt: Wenn eine Proportionalität zwischen Keimvolumen und Keimwert bestände, so würden die Keimoberflächen relativ zu groß sein. Da nun bereits festgestellt wurde, daß die Organzellengröße fixiert ist, so könnten die Keimoberflächen nur dann relativ zu groß sein, wenn die Epithelien der Kleinkeime dünner als normal wären. Da das nicht der Fall ist, so geht daraus hervor, daß nicht nur die Zellgröße, sondern auch die Zellform eine fixe ist. Aus diesen beiden Tatsachen und aus der bereits festgestellten Proportionalität von Keimwert und Zellenzahl läßt sich die Proportionalität von Keimoberfläche und Keimwert ableiten.

2n) Allgemeinstes Ergebnis der Versuche an Echinodermen-Eiern in bezug auf das Determinationsproblem. Obwohl das Echiniden-Ei eine typische Mosaikfurchung aufweist, haben die Versuche Driesch's doch ergeben, daß Mosaikfurchung kein Mosaik der Potenzen zu sein braucht. Es sind also die organbildenden Keimbezirke des Seeigeleies nicht unabänderlich zu bestimmten Leistungen determiniert, sondern es ist das Schicksal jedes Ei- oder Furchungsstadiumsbezirkes abhängig von seiner Lage im ganzen. Dieser letztere Satz erfährt nur in bezug auf den animalen Teil eine gewisse Einschränkung, insofern Bruchstücke desselben nicht unter allen Umständen Larven mit Darm und Mesenchym zu liefern brauchen.

3. Experimente mit Eiern, die sich ähnlich wie die Echinodermen-Eier verhalten. 3a) Die Experimente an Meduseneiern. Die grundlegenden Versuche rühren von R. Zoja her, welche dann später durch Maas erweitert und ergänzt wurden. Die isolierten Furchungszellen der verschiedenen Eisorten zeigten eine sehr verschiedene Fähigkeit zur Ganzentwickelung. Obenan standen in dieser Hinsicht Medusen mit Generationswechsel, wie Clytia, Laodice und Mitrocoma, während das andere Ende der Reihe die Trachomedusen mit direkter Entwickelung, Liriope und Geryonia, einnahmen. Bei Clytia flavidula isolierte Zoja Zellen des 2-, 4-, 8- und 16-Zellenstadiums und zog aus allen ganze kleine Larven mit beiden Keimblättern. Die $^1/_2$- und $^1/_4$-Holoblasten bildeten nach dem Festheften auch ganz normale Polypen aus. Bei Laodice cruciata dehnte Zoja seine Isolationsversuche bis zum 16-Zellenstadium aus und erhielt geschlossene Planulae. Einige der Larven, welche aus isolierten Blastomeren des 4- und 8-Zellenstadiums entstanden waren, setzten sich auch fest und bildeten Perisark, entwickelten sich aber sonst nicht weiter zu Polypen. Im Gegensatz zu diesen Versuchen, welche die Fähigkeit, ganze kleine Planulae zu erzeugen, auch noch für isolierte Zellen des 16-Zellenstadiums dartaten, stehen jene an den genannten Trachomedusen. Eine isolierte Zelle des 2-Zellenstadiums lieferte bei diesen nach Zoja und Maas zwar auch noch eine ganze kleine Meduse mit Mund, Schirmhöhle und den 4 kreuzweise gestellten Primärtentakeln, aber schon die $^1/_4$-Larve brachte es nicht mehr zu einer wirklichen Meduse, wenn sie auch einen geschlossenen Entodermsack, Gallerte und an der Subumbrella differenziertes Ektoderm aufwies. Aus isolierten Zellen des 8-Zellenstadiums entstanden aber nicht einmal mehr solche Larven, sondern Zellenhaufen oder Zellenplatten, die

Digitized by Google

bald zugrunde gingen. Bei Liriope und Geryonia ist demnach die Grenze der Aequipotentialität der Furchungszellen auf einem früheren Stadium erreicht als bei den Hydromedusen mit Generationswechsel.

3b) Die Experimente an Nemertinen. Sie ergaben eine Aequipotentialität bis zum 4-Zellenstadium; aus den isolierten Zellen entstehen bis dahin ganz kleine Pilidien. Auf dem 8-Zellenstadium macht sich dagegen eine Beschränkung der Potenzen insofern bemerkbar, als die Larven aus animalen Zellen ein Apicalorgan, aber kein Archenteron bilden, während es bei den Larven aus vegetativen Achterzellen gerade umgekehrt ist, und 4 seitliche Zellen des 8-Zellenstadiums Pilidien mit Apicalorgan und Archenteron aus sich hervorgehen lassen (E. B. Wilson und seine Schüler).

3c) Die Experimente an Amphioxus. Auch diese haben ganz dasselbe Resultat geliefert. Auch hier werden nach den Untersuchungen von E. B. Wilson aus isolierten Viererblastomeren noch ganze kleine Tiere, während aus isolierten Achterzellen keine Larven mit Ekto- und Entoderm mehr hervorgehen. Bei unvollständiger Trennung und Verdrehung der Blastomeren gegeneinander entstehen Verwachsungszwillinge oder verwachsene Mehrfachbildungen, deren einzelne Individuen jede beliebige Lage zueinander aufweisen können, wie beistehende Figur 26 zeigt. Es herrschen hier also infolge Verdrehung der Blastomeren gegeneinander nicht die regelmäßigen Lagerungsverhältnisse, welche sich bei den Verwachsungszwillingen der Echinodermen zu erkennen gaben.

3d) Experimente am Teleostierei (Fundulus). Diese Versuche wurden von T. H. Morgan schon sehr bald nach den Drieschschen Versuchen an Echinodermeneiern angestellt. Wird von der Keimscheibe eine der beiden ersten Blastomeren entfernt, so rundet die überlebende Furchungszelle ihre anfangs flache Kontaktfläche mit der anderen Zelle ab und fährt fort, sich zu teilen. Die Furchungsstadien sind bis auf die reduzierte Größe der ganzen Keimscheibe eine genaue Kopie der normalen. Ein interessantes Ergebnis wurde mit solchen Furchungsstadien erhalten, bei denen die beiden ersten Zellen von ungleicher Größe waren. Wurde bei diesen die kleinere entfernt, so erhielt man einen größeren, wurde dagegen die größere fortgebracht, einen kleineren Embryo als in jenen Fällen, wo beide Blastomeren von gleicher Größe waren. Daraus geht hervor, daß die Größe des Embryos von der Größe der Furchungszelle, also von der Menge des lebenden Protoplasmas und nicht von der des Nahrungsdotters abhängig ist, welche in allen drei Fällen selbstverständlich immer die gleiche bleibt. Auch nach Entfernung von 3 Zellen des Vierzellenstadiums sah Morgan aus der überlebenden Zelle einen ganzen kleinen Embryo hervorgehen.

3e) Die Experimente am Cyclostomenei. Die Experimente am Cyclostomenei sind einmal wegen der großen Aehnlichkeit des letzteren mit dem Amphibienei, dann aber auch deswegen von großem Interesse, weil sich an dem Ei von Petromyzon Planeri nach Nuel sogar schon im unbefruchteten Zustande an der Größe der Dotterkörner die künftige Lage der Rückenfurche erkennen lassen soll. Die Beobachtungen über die Potenzen isolierter Blastomeren rühren von Bataillon (1900) her. Derselbe sah erstens spontan 2 Embryonen aus einem Ei entstehen. Das Eimaterial stammte in diesem Falle von einem Weibchen, das bereits gelegt hatte, aus dem aber nach dreitägiger Gefangenschaft noch ca. 100 Eier gewonnen und befruchtet werden konnten. Aus 40 % dieser Eier gingen Zweistadien hervor, deren Furche viel ausgeprägter war, als das gewöhnlich der Fall ist. Die Eier gaben in der Folge je zwei Morulis, zwei Blastulis und meist auch zwei Gastrulis den Ursprung, doch schlüpften nur in 4 Fällen zwei wirklich vollkommen ausgebildete Larven aus, während sich in anderen Fällen nur eine Gastrula weiter entwickelte, die zweite aber zerfiel. Nach den Resultaten von Spe-

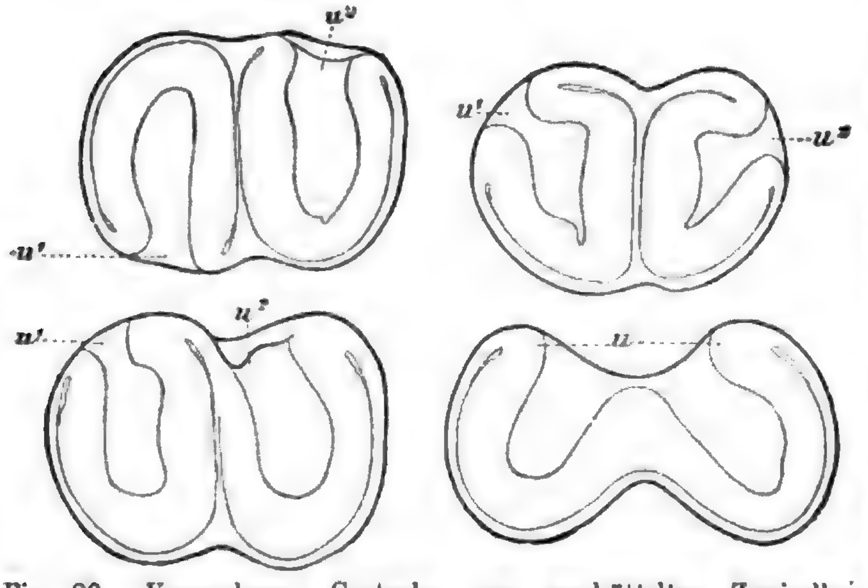


Fig. 26. Verwachsene Gastrulae aus geschüttelten Zweizellenstadien des Amphioxuseies. Nach E. B. Wilson. Aus O. Hertwig, Allgemeine Biologie.

mann, die wir gleich kennen lernen werden, ist anzunehmen, daß in diesen letzteren Fällen die erste Furchungsebene nicht mit der Medianebene des Embryos zusammenfiel. **Bataillon** hat aber zweitens Zwei- und Mehrfachbildungen aus einem Ei auch experimentell erzeugt. Er nahm die Befruchtung in gewöhnlichem Wasser vor und brachte die Eier dann in eine 10prozentige Zucker- oder 1prozentige NaCl-Lösung, worin sie 18 Stunden verblieben. Sie waren nach dieser Zeit auf dem 2-, 4-, 8- oder 10zelligen Stadium stehen geblieben und wiesen tief einschneidende Furchen auf. Wurden die Eier nun in gewöhnliches Süßwasser zurückgebracht, so furchten sie sich weiter und lieferten so viele Keime, wie Zellen in dem Wasser von höherem osmotischen Druck gebildet worden waren. Diese Blastulae entwickelten sich aber nicht alle zu Larven weiter. Das geschah vielmehr nur in den Fällen, wo im Momente der Uebertragung der Eier aus der hypertonischen Lösung in gewöhnliches Wasser nur 2 Zellen gebildet worden waren. Schon aus Eiern, die im Wasser von höherem osmotischen Druck 3 Zellen gebildet hatten, sah **Bataillon** nur drei Gastrulae, nicht aber drei Larven mit Medullarrohr hervorgehen. Hatte ein unregelmäßiger Furchungsmodus mehreren Keimen den Ursprung gegeben, so entwickelte sich nur der voluminöseste über die Blastula hinaus. War die Zahl der Blastulae zu groß (4 bis 8), so schlug ihre Weiterentwickelung stets fehl.

3f) Die Experimente mit Tritoneiern. Sie führten unter der Hand von **Endres**, **Herlitzka** und **Spemann** ebenfalls zu einem anderen Resultat als jene mit Anureneiern. Alle drei Forscher bedienten sich der Methode der Durchschnürung des Zweizellenstadiums mittels eines Fadens oder eines Haares, und **Herlitzka** war der erste, welcher aus beiden Zellen die Entstehung einer ganzen kleinen Larve beobachten konnte (Fig. 27). Eine solche gleichförmige

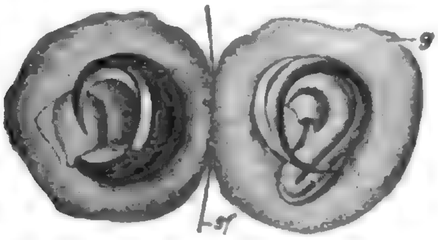


Fig. 27. Auf dem Zweizellenstadium durchschnürtes Tritonei, von dem beide Zellen eine ganze kleine Larve erzeugt haben. Nach Herlitzka. Aus O. Hertwig, Allgemeine Biologie. sf Seidenfaden.

Entwickelung der beiden isolierten Blastomeren erhält man aber nur in seltenen Fällen. Gewöhnlich entsteht nur aus der einen eine vollständig ausgebildete Larve, während die andere zwar gastruliert, aber die Weiterentwickelung zu einer ganz ausgebildeten Larve einstellt. **Spemann** leitete dieses verschiedene Verhalten von dem verschiedenen Wert ab, den die erste Furche beim Triton-Ei haben kann. Nach ihm fällt dieselbe nämlich in $^1/_4$ bis $^1/_3$ der Fälle mit der Medianebene zusammen, während sie sonst vorn oben von hinten unten trennt. **Spemann** meint nun, daß man dann aus jeder Blastomere des durchschnürten Zweizellenstadiums eine vollständig ausgebildete Larve erhält, wenn die erste Furche mit der Medianebene zusammenfiel, während sonst nur die isolierte „dorsale" Blastomere die Entwickelung bis zur völlig ausgebildeten Larve fortsetzt, die „ventrale" sie dagegen unvollkommen vollführt.

3g) Zwillinge und Doppelbildungen bei Säugetieren und dem Menschen und Roux's Regel von der doppelten Symmetrie der Organanlage. Die Entdeckung **Driesch's** von der Entstehung zweier ganzer kleiner Embryonen und von Verwachsungszwillingen aus einem Ei nach vollständiger oder unvollständiger Trennung der beiden Blastomeren des Zweizellenstadiums haben ebenso wie die ähnlichen Resultate der anderen eben genannten Autoren ein Licht auf die Entstehung von Zwillingen und Doppelbildungen bei Säugetieren und beim Menschen geworfen. Man kann nämlich nunmehr als sicher annehmen, daß alle Zwillinge, welche sich zum Verwechseln ähnlich sehen, und gleichen Geschlechtes sind, infolge Trennung der beiden ersten Furchungszellen voneinander entstanden sind. Bei dem Gürteltier scheint die Entstehung von 4 Individuen aus einem Ei sogar die Regel zu bilden. Dieselben sind gleichen Geschlechts und haben eine gemeinsame Placenta, welche als Charakteristikum der sogenannten eineiigen Zwillinge resp. Mehrfachbildungen gilt. Die Ursache der Trennung der ersten beiden oder ersten vier Furchungszellen wie beim Gürteltier sind uns natürlich zunächst ganz unbekannt. Für das Verständnis der Doppelbildungen (Verwachsungszwillinge) haben, abgesehen von den Arbeiten von **Driesch**, namentlich auch die Untersuchungen von **Spemann** an geschnürten Triton-Eiern und -Keimen viel Material herbeigetragen. Studiert man die Lage der beiden Partner von menschlichen und tierischen Doppelbildungen, so konstatiert man auch da in sehr vielen Fällen eine Verdrehung der Medianebenen der Partner zur ersten Furche, und zwar so, daß eine spiegelbildliche Verwachsung der beiden Partner mit gleichen Seiten die Folge ist. So trifft man Doppelbildungen an, deren Komponenten mit den

Digitized by Google

Ventralseiten, mit den Dorsalseiten oder auch mit den Scheiteln verwachsen sind. Diese Verdrehung der Symmetrieebenen der beiden Partner zur ersten Furche kann aber auch unterbleiben, so daß die beiden Medianebenen parallel zur ersten Furche zu liegen kommen. Auch in solchen Fällen sind aber die beiden Partner symmetrisch zueinander gelagert, so daß Roux von einer doppelten Symmetrie der Organanlagen reden konnte. Es sind also bei Doppelbildungen mit Verdoppelung der Achsenorgane alle Teile symmetrisch zu einer Hauptsymmetrieebene, der ersten Furchungsebene, angelegt, auch wenn später durch ungleiches Wachstum Asymmetrieen sich einstellen. Diese Regel Roux's umfaßt die von Driesch konstatierten Verdrehungen der Medianebenen der beiden Partner zur ersten Furchungsebene als Spezialfälle symmetrischer Lagerung mit unter sich. Daß alle Doppelbildungen durch unvollständige Trennung der beiden ersten Furchungszellen oder der beiden Keimhälften entstanden sein müssen, darf jedoch keineswegs behauptet werden, denn wir werden später noch eine ganz andere Methode zur Erzielung von Verwachsungszwillingen kennen lernen.

3h) Gleichgültigkeit der Halb- oder Ganzfurchung der isolierten Furchungszellen für die Halbheit oder Ganzheit der auf die Furchung folgenden Embryonalentwickelung. Weiter oben ist bereits auf die Wichtigkeit hingewiesen worden, welche die Halbfurchung auch bei nachfolgender Ganzentwickelung für die deterministische Auslegung der Versuchsresultate hat. Furcht sich nämlich ein isolierter Eiteil defekt, liefert er aber trotzdem ganze Larven, so könnte man dies so auffassen, daß die einzelnen Teile des Eies zwar bereits auf bestimmte Leistungen eingestellt waren, daß sie aber trotzdem noch nicht die Fähigkeit, das Ganze hervorzubringen, verloren hatten. Es wurde aber bereits oben darauf hingewiesen, daß dieser Schluß nur dann Berechtigung hat, wenn Furchung und Embryonalentwickelung wirklich von denselben Faktoren abhängen. Die Untersuchungen von E. B. Wilson am Amphioxus-Ei und die desselben Forschers und seiner Schüler Zeleny und Yatsu am Ei von Cerebratulus haben nun Resultate zutage gefördert, welche diese letztere Frage zu entscheiden gestatten. Wilson fand nämlich, daß sich die isolierten Blastomeren des Zweizellenstadiums des Amphioxus-Eies in vielen Fällen wie ein ganzes Ei furchten, ja, daß dies sogar noch isolierte Zellen des Viererstadiums tun konnten, obwohl bei diesen letzteren der inäquale Typus auf dem 4-Zellenstadium häufiger als bei den isolierten Blastomeren des Zweizellenstadiums war. Für die Weiterentwickelung über die Blastula hinaus war aber die Ganz- oder Teilfurchung der isolierten Furchungszellen des 2- und 4-Zellenstadiums ganz gleichgültig. Die weitere Entwickelung war stets ganz. Beweisend für die Gleichgültigkeit des Furchungsmodus für Ganz- und Defektentwickelung der Larven sind auch jene Versuche von Driesch, wo nicht Furchungsstadien, sondern ungefurchte, befruchtete Eier zerschüttelt wurden, und wo auch stets Ganzentwickelung erfolgte, mochten sich die Eibruchstücke ganz oder defekt furchen. Auch die Beobachtungen Boveris an befruchteten Eiern, die ihre Entwickelung mit einem Monaster an Stelle eines Dyasters beginnen, sprechen in demselben Sinne. Solche Monastereier furchen sich nämlich, trotzdem ihnen nichts an Material genommen ist, defekt, lassen aber ebenfalls ganze Larven aus sich hervorgehen. Ganz dasselbe zeigen endlich die Experimente am Nemertinen-Ei. Eine isolierte Blastomere des Zweizellenstadiums furcht sich halb, entwickelt sich aber ganz; ein Fragment des unbefruchteten Eies entwickelt sich dagegen nach Befruchtung nicht nur ganz, sondern furcht sich auch so. Das letztere tut auch noch ein kernhaltiges Fragment des befruchteten Eies bis zur Abtrennung des ersten Richtungskörpers, ohne daß aber jetzt die Ganzfurchung auch noch von Ganzentwickelung gefolgt zu sein braucht, wie Yatsu konstatieren konnte. Diese letzten Resultate beweisen nicht nur, wie die zuerst angeführten Tatsachen, die Gleichgültigkeit des Furchungsmodus für den Entwickelungsmodus, sondern sie zeigen auch, daß der Furchungstypus der Eier und ihrer Fragmente von anderen Faktoren abhängt als die morphologische Ausgestaltung der Larve, denn wäre das nicht so, dann dürften Fragmente, die sich ganz furchen, keine Larven mit Defekten liefern. Wenn man Furchungs- und Entwickelungsmodus vom Eibau abhängig sein läßt, so ist also der Eibau, welcher die Furchung bestimmt, ein anderer als der, von welchem die weitere Entwickelung abhängt. Für die Richtigkeit dieser Schlußfolgerung kann man auch die Entwickelung des Frosch- und des Seeigeleies anführen. Nach Brachet geht nämlich die Medianebene des Embryos stets durch den höchsten Punkt des grauen Halbmondes, gleichgültig, wie auch die erste Furche zu dieser Symmetrieebene des ungefurchten befruchteten Eies gelegen sein mag. Zusammenzufallen brauchen ja beide nicht, um normale Entwickelung zu ermöglichen. Und bei dem Seeigelei werden die Orte der ersten Organbildungen stets durch die Schichtung in der Richtung der Eiachse bestimmt, gleich-

Digitized by Google

gültig, ob die erste Furche auch durch sie hindurchgeht oder senkrecht auf ihr steht, wie dies Boveri in einigen Fällen an Strongylocentrotus-Eiern beobachten konnte, die bei der ersten Teilung in eine animale und eine vegetative Zelle getrennt wurden. Bei solchen Eiern unterblieb die Mikromerenbildung entweder vollkommen oder es entstanden einige kleine Zellen an der Grenze zwischen animaler und vegetativer Hälfte, also gegen die normalen Mikromeren, die am vegetativen Pol entstehen sollten, um 90° verlagert. In diesen Fällen fiel demnach der Bau, von dem der Furchungstypus abhing, nicht mit dem zusammen, der die Entstehungsorte der ersten Organanlagen bestimmt.

Wegen dieser Unabhängigkeit von Furchung und späterer Entwickelung darf man infolgedessen von einer beobachteten Defektfurchung nicht auf eine bereits erfolgte Determinierung bestimmter Eiteile und Furchungszellen zu bestimmten Teilen des Embryos schließen, denn eine Defektfurchung zeigt nur, daß der Eibau in dem Bruchstück defekt ist, von dem die Furchung abhängig ist, während sie über die Frage, ob die Potenzen der isolierten Eifragmente bereits auf bestimmte Embryonalleistungen eingestellt waren oder nicht, gar nichts aussagen kann.

4. Experimente mit Eiern, die sich ähnlich wie das Froschei verhalten. Sind im vorhergehenden eine große Anzahl von Tierformen namhaft gemacht worden, deren isolierte Furchungszellen sich ähnlich wie diejenigen der Echinodermen verhielten, so haben wir nunmehr aber auch solche Eisorten zu nennen, die ähnliche Resultate wie das Froschei ergaben.

4a) Die Versuche am Ctenophoren-Ei. Die Versuche am Ctenophorenei gehen auf Chun zurück, der im pelagischen Auftrieb zufällig in einer Eihülle zwei Embryonen von Eucharis multicornis fand, von denen jeder anstatt 8 Rippen nur 4 und anstatt 2 Tentakeln nur eines aufwies. Er vermutete, daß bei diesen Eiern die Furchungskugeln des Zweizellenstadiums durch einen Insult getrennt worden wären, und daß sich jede der beiden Zellen zu einer halben Ctenophore weiter entwickelt hätte. Und es gelang ihm in der Tat, durch Schütteln der Eier auf dem Zweizellenstadium das gleiche Resultat zu erhalten, das ihm vorher die Natur selbst dargeboten hatte. Diese halben Ctenophoren sind zwar allseitig von Ektoderm umkleidet, aber ihre Organisation ist durchaus halb. Driesch und Morgan wiederholten die Versuche Chuns an Beroe ovata und konnten sie im wesentlichen bestätigen, wenn auch die Zahl der Magentaschen der Halblarven nicht immer dem Keimwert entsprach, sondern größer sein konnte. Fischel hat dann die Versuche am Ctenophoren-Ei noch weiter ausgebaut und folgende Ergebnisse hinzugefügt: Werden die Furchungszellen eines Eies mittels einer eingeklemmten Pinzette oder des stumpfen Rückens eines kleinen Messerchens in mehrere Partien auseinander getrieben, so ergänzen sich die Rippen der Larven, welche aus diesen Bruchstücken hervorgehen, zur Zahl 8. So besaßen z. B. in einem Falle eine Larve 3, zwei andere Larven je 2 und eine kleine vierte Larve 1 Rippe. Was aber das apicale Statolithenorgan anbelangt, so erhielt von den Partiallarven nicht etwa nur eine den ganzen oder mehrere einen Teil vom ganzen Apparat, sondern es bekam von den größeren Partiallarven eine jede das ganze Gleichgewichtsorgan. Letzteres nimmt also eine gegewisse Ausnahmestellung ein, was sich auch bei Versuchen zu erkennen gab, wo die Mikromeren verlagert wurden. Um dies zu verstehen, müssen wir beistehende Figuren 28 A u. B

A B

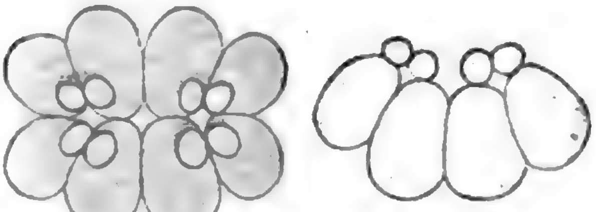


Fig. 28. 16-Zellenstadium vom Ctenophorenei. A vom animalen Pol, B von der Seite. Schematisch. Nach Ziegler. Aus Korschelt und Heider.

uns ansehen, welche das 16-Zellenstadium von Beroe ovata schematisch wiedergeben, und zwar Figur 28 A vom animalen Pole aus und B von der Seite. Wir sehen da auf 8 Makromeren 4 Paare von Mikromeren liegen. Die seitlichen Makromeren sind etwas kleiner als die mittleren und liegen auch etwas über den letzteren, wie Figur 28 B erkennen läßt. Figur 29 A gibt nun die Verlagerung der Mikromerenpaare wieder, die zwar immer noch ziemlich symmetrisch liegen, aber doch eine andere Lage als in der Norm einnehmen, was namentlich an dem weiten Zwischenraum zwischen den linken und rechten Mikromerenpaaren auffällt. Die Larve, welche aus diesem 16-Zellenstadium hervorging, ist in Figur 29 B abgebildet. Das Wesentliche an ihr ist, daß sie anstatt eines zwei apicale Statocysten aufweist, zu denen je 4 Rippen konvergieren. Es ist das ein Resultat, welches mit der Erzeugung von Larven mit zwei Urdärmen statt eines nach Trennung der Zellen des vegetativen Poles des Echiniden-Eies auf gleicher Stufe steht. Die Larve zeigt außerdem, daß mit

Digitized by Google

der Verlagerung der Mikromeren auch eine Verlagerung der Rippen einhergeht, was aber andere Experimentalfälle noch viel deutlicher zeigen als der abgebildete. Es geht daraus hervor, daß der Ort der Rippenbildung von der Lage der Mikromeren abhängt. Daraus läßt sich nun freilich zunächst noch nicht schließen, daß die Anwesenheit der letzteren zur Rippenbildung unumgänglich notwendig ist, sondern es zeigt das Verlagerungsexperiment nur, daß, wenn Mikromeren vorhanden sind, die Lage derselben auch die der Rippen bestimmt, nicht aber,

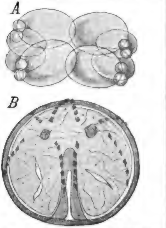


Fig. 29. A 16-Zellenstadium von Beroe ovata mit verlagerten Mikromeren. B die daraus entstandene Larve mit 2 statischen Organen, um welche die 8 Rippen zu je vieren gruppiert sind. Nach Fischel. Aus Korschelt und Heider.

daß bei Abwesenheit von Mikromeren auch Rippen fehlen müssen. Fischel hat aber auch dies letztere einwandsfrei nachgewiesen. Entfernte er z. B. auf dem 16-Zellenstadium 2 Makro- und 2 Mikromeren, so erhielt er Larven mit 6 Rippen, entfernte er dagegen nur 1 oder 2 Makromeren, so entstanden stets Larven mit allen 8 Rippen. Es ist also ganz sicher, daß schon auf dem 16-Zellenstadium jede der 8 vorhandenen Mikromeren zur Lieferung einer Reihe von Ruderplättchen fest determiniert ist.

4b) Die Versuche von E. B. Wilson am Patella-Ei. Das Ei der Napfschnecke Patella furcht sich ähnlich wie das oben in seiner Entwickelung geschilderte Nereis-Ei, und auch die prospektive Bedeutung der einzelnen Furchungszellen ist in beiden Fällen eine ähnliche. Die Isolationsversuche haben nun ergeben, daß beim Schneckenei dem Furchungsmosaik tatsächlich ein Mosaik der Potenzen entspricht, denn die durch kalkfreies Seewasser getrennten Furchungszellen entwickelten sich genau zu denselben Bildungen, die sie auch geliefert hätten, wenn sie im Verbande mit den anderen geblieben wären. Die Furchungszellen des Schneckeneies zeigen also in auffälligster Weise das Phänomen der Selbstdifferenzierung, d. h. es bildet sich jede von ihnen aus in ihr liegenden Ursachen ohne irgendwelche Beihilfe der anderen Zellen zu bestimmten Teilen des Embryos aus. Ganz das gleiche Ergebnis lieferten auch Experimente mit anderen Mollusken, auf welche weiter unten näher eingegangen werden soll.

4c) Die Versuche am Ascaris-Ei. Auch diese Versuche, die auf Anregung Boveris von Miß Stevens mittels einer besonderen Methode angestellt wurden, ergaben im Grunde das gleiche Resultat. Sie verfuhr dabei so, daß sie einzelne Blastomeren des gefurchten Eies mittels ultravioletten Lichtes abtötete, indem sie diejenigen Zellen, welche erhalten bleiben sollten, durch Stanniolstreifen schützte. Auch hier lieferten die überlebenden Zellen genau das, was sie geliefert haben würden, wenn sie im Verband mit den anderen geblieben wären.

4d) Die Versuche am Ascidien-Ei. Die Versuche am Ascidienei, welche bereits im Jahre 1887 von Chabry angestellt worden sind, aber von den einzelnen Forschern verschiedene Auslegung erfuhren, sind schließlich durch die Nachuntersuchungen Conklins dahin entschieden worden, daß die Entwickelung isolierter Zellen des Zweizellenstadiums in bezug auf die paarigen Organe typisch halb ist, obwohl die Larven äußerlich ganz überhäutet sind und die axialen Organe in ganzer Ausbildung aufweisen.

So haben wir also auf der einen Seite Eier, deren Furchungszellen nach Isolation genau das bilden, was die deskriptive Forschung über ihre prospektive Bedeutung lehrt, und auf der anderen solche, deren isolierte Furchungszellen bis zu einem gewissen Stadium noch das Ganze zu leisten vermögen. Zu der ersten Sorte von Eiern gehören das Froschei, das Ctenophoren-Ei, das Mollusken- und wohl auch das Anneliden-Ei, das Ascaris-Ei und das Ascidien-Ei, während zu der zweiten Kategorie das Echinodermen-Ei, das Nemertinen-Ei, das Medusen-Ei, das Amphioxus-Ei, das Cyclostomen-Ei, das Teleostier-Ei, das Urodelen-Ei und wohl auch die Eier der Reptilien, Vögel und Säugetiere zu rechnen sind. Mit den drei letzten Eisorten sind zwar noch keine Experimente gemacht worden, doch stehen uns hier zur Beurteilung der prospektiven Potenzen der Furchungszellen wenigstens „Naturexperi-

Digitized by Google

mente" in Gestalt von Zwillingen und Doppelbildungen zur Verfügung.

Es fragt sich nun, ob zwischen den beiden Eikategorien wirklich prinzipielle Gegensätze vorliegen, oder ob sich die beiden heterogenen Erscheinungsreihen schließlich doch noch unter einen Hut bringen lassen?

5. **Versöhnung der scheinbar einander widersprechenden Tatsachen.** 5a) Der Mangel der Regulierbarkeit des defekten Eibaues zum Ganzeibau kann schuld sein an der Defektentwickelung überlebender Furchungszellen. α) Die Experimente O. Schultzes. Nachdem Roux gezeigt hatte, daß aus überlebenden Furchungskugeln des Zweizellenstadiums der Froscheier halbe Embryonen hervorgehen, erregte es außerordentliches Aufsehen, als Oscar Schultze 1894 Versuche publizierte, die bewiesen, daß unter Umständen auch die beiden ersten Zellen des Froscheies Ganzbildungen aus sich hervorgehen lassen können. Die Versuchsmethode bestand darin, daß die Froscheier zwischen zwei Glasplatten mit aufgekitteten Glasstreifen maximal gepreßt wurden, in Normalstellung mit dem schwarzen Pol bis zum Zweizellenstadium blieben, dann aber um 180° gedreht und mit dem weißen Pol nach oben bis zum Beginn der Gastrulation gehalten wurden. Dann wurde die Deckplatte abgelöst und die andere Platte mit den Eiern in derselben Stellung wie vorher in eine Schale mit frischem Wasser gebracht, das ein- bis zweimal täglich gewechselt wurde. Aus den so behandelten Eiern ging stets ein größerer oder geringerer Prozentsatz an Doppelbildungen hervor, von denen die meisten Duplicitates anteriores waren, neben denen aber auch vollständige Doppelbildungen vorkamen, wie die beiden Figuren 30 und 31 zeigen. Durch einen Kunstgriff

Fig. 30. Doppelmißbildung von Rana fusca. Nach O. Schultze. Aus O. Hertwig, Allgemeine Biologie.

war es also gelungen, jede der beiden ersten Furchungszellen zur Lieferung einer Ganzbildung statt einer Halbbildung zu zwingen. Durch Kombination der Schultzeschen Umdrehmethode mit dem Rouxschen Anstichverfahren hat Morgan ebenfalls aus einer Blastomere des Froscheies ganze Embryonen züchten können. Er tötete zunächst mit der heißen Nadel eine Furchungskugel des Zweizellenstadiums ab und hielt dann die operierten Eier teils in Normalstellung mit dem schwarzen Pol nach oben, teils in umgekehrter mit dem weißen Pol nach oben. Aus den letzteren gingen in der Mehrzahl der Fälle Ganzbildungen, aus den ersteren dagegen stets Halbbildungen hervor, vorausgesetzt, daß die angestochene Zelle wirklich abgetötet worden war.

β) Die Auslegung der Experimentalresultate O. Schultzes. Roux hatte bereits auf der Versammlung der anatomischen Gesellschaft in Straßburg gleich im

Fig. 31. Doppelembryo von Rana fusca. Nach O. Schultze. Aus O. Hertwig, Allgemeine Biologie.

Anschluß an den Vortrag von O. Schultze die Versuche des letzteren durch die Annahme zu erklären versucht, daß sich die verschieden schweren Dottersubstanzen in den beiden Blastomeren nach der Umkehrung der gefurchten Eier um 180° in einer Weise umordnen, daß in jeder eine Dotteranordnung wie in einem ganzen Ei die Folge ist. Die Untersuchungen Wetzels ergaben, daß diese Auslegung in der Tat das Richtige trifft. Untersucht man nämlich Doppelbildungen, welche mittels der Schultzeschen Methode erhalten wurden, auf dem Blastulastadium auf Schnitten, so bemerkt man, innerhalb des Gesamtgebildes zwei Furchungshöhlen, welche durch großzelliges, weißes Dottermaterial voneinander getrennt sind. Schneidet man einen solchen Keim mit 2 Blastocölen, wie einer in Figur 32 dargestellt ist, in der Mitte durch, so ist die Zellenanordnung in jeder Hälfte gleich der in einem Ganzkeim von normaler Größe. Während also in dem Anstichversuch Roux's der Eibau in der überlebenden Zelle halb bleibt, ist er mittels der Schultzeschen Methode in jeder Blastomere zu einem Ganzeibau umgemodelt worden. Der Mangel der Regulierbarkeit des Defekteibaues zu einem Ganzeibau trägt demnach die Schuld,

Fig. 32. Schnitt durch eine Doppelblastula von Rana fusca. Nach Wetzel. Aus O. Hertwig, Allgemeine Biologie.

Digitized by Google

daß eine überlebende Furchungskugel des Zweizellenstadiums des Froscheies einen halben Embryo liefert.

γ) Die Aequipotentialität der Teile des ungefurchten Eies. Es gibt nun aber in der Entwickelungsgeschichte des Froscheies Stadien, auf denen die Eiteile noch äquipotentiell sind, wo man also nach Abtöten eines Teiles nicht Defekt-, sondern Ganzembryonen erhält. Das hat Brachet durch systematische Versuche mittels Anstichs mit einer heißen Nadel nachgewiesen. Er führte nämlich die Operation $^1/_4$, $^1/_2$, $^3/_4$ Stunden bis 2 Stunden nach Zusatz des Samens aus und studierte die Weiterentwickelung des überlebenden Eiteiles. Dabei stellte es sich heraus, daß bis $^3/_4$ Stunden nach Zusatz des Samens stets ganze und normale Embryonen aus dem überlebenden Eiteil hervorgingen. Bis dahin ist aber das Spermatozoon noch gar nicht in das Ei eingedrungen, sondern hat erst die Gallerthülle durchsetzt. 1 Stunde nach Zusatz des Samens ist aber die Befruchtung wirklich eingetreten und die Anstichversuche beginnen jetzt andere Resultate zu liefern. Zu Anfang sind die Embryonen zwar nur asymmetrisch ausgebildet, sind aber 1½ bis 2 Stunden nach Zusatz des Samens verstrichen, so erhält man nach Abtötung der einen Eihälfte Halbembryonen genau so, wie wenn man eine der beiden ersten Blastomeren ausgeschaltet hätte. Das Froschei kann also anfangs noch seinen defekten Eibau zu dem eines ganzen Eies umregulieren, was ½ Stunde nach Eindringen des Spermatozoons in das Ei nicht mehr möglich ist. Dann ist der Eibau, von dem die Entstehungsorte der Organbildungen abhängig sind, für die Bedingungen, unter denen sich das Froschei normalerweise befindet, fixiert, so daß es besonderer Manipulationen bedarf, um trotzdem noch einen defekten Eibau in einen ganzen umregulieren zu können. Der Unterschied zwischen dem Anuren- und dem Urodelen-Ei besteht demnach nur darin, daß das erstere früher, vor der ersten Furchung, seine Regulationsfähigkeit zum Ganzen nach Wegnahme von Teilen, das andere sie später verliert, da es dieselbe ja noch auf dem 2-Zellenstadium besitzt.

5b) Das Vorhandensein bestimmter „organbildender Stoffe" in bestimmten Eibezirken und später in bestimmten Zellen kann die Ganzentwickelung isolierter Blastomeren verhindern.

α) Die Experimente von E. B. Wilson am Dentalium-Ei liefern den Beweis, daß Defektentwickelung isolierter Blastomeren auch an dem Mangel an bestimmten „organbildenden Substanzen" oder, wollen wir uns vorsichtiger ausdrücken, an bestimmten lokalisierten Entwickelungsbedingungen liegen kann.

*α*₁) Beschreibung der Furchung des Dentalium-Eies. Um die Experimente zu verstehen, muß man sich erst mit der Furchung dieses Mollusken-Eies vertraut machen. Das ungeteilte, ja sogar das unreife Ei läßt drei verschiedene Eiregionen erkennen: an den beiden Polen eine pigmentfreie Kappe und dazwischen eine rötlichbraune oder ziegelrote Zone, so daß das Ganze eine gewisse Aehnlichkeit mit einem

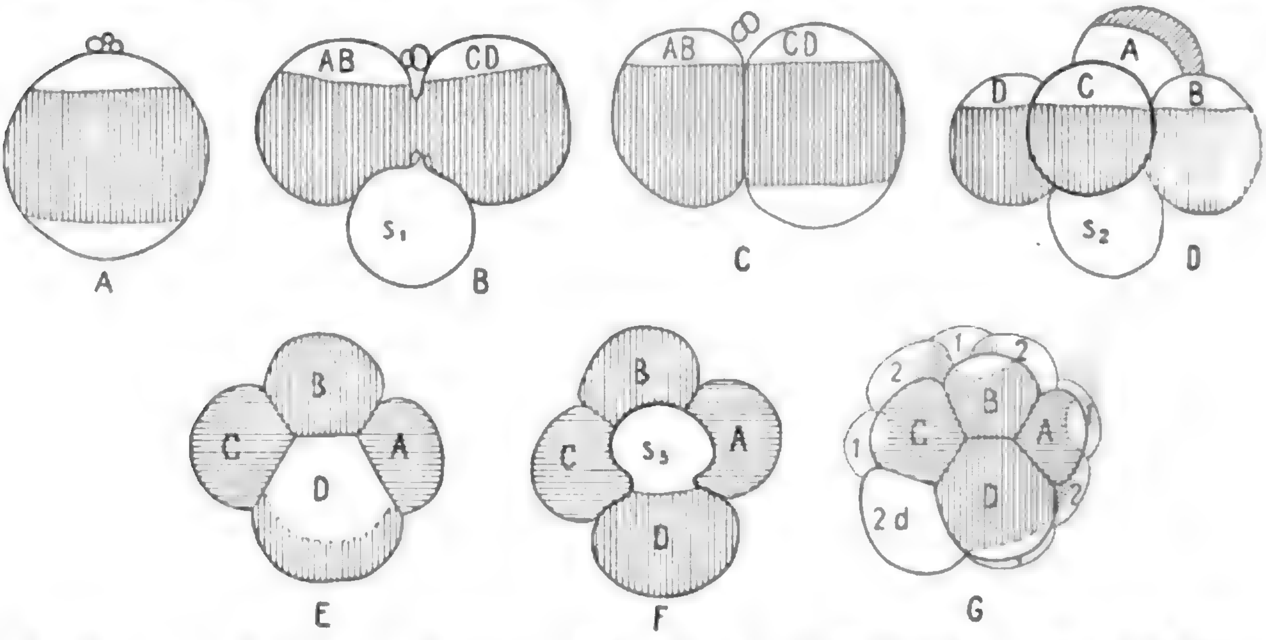


Fig. 33. A—G Furchung des Dentalium-Eies bis zum 16-Zellenstadium. Nach E. B. Wilson. s_1 primärer, s_2 sekundärer, s_3 tertiärer Dottersack, dessen Hauptteil in 2d, den ersten Somatoblasten, hineingelangt. A—D von der Seite, E—G vom vegetativen Pol gesehen. In G bezeichnen die Zahlen 1 Zellen des ersten und die Zahlen 2 solche des zweiten Mikromerenquartetts.

Digitized by Google

reifen Ei von Strongylocentrotus erhält (Fig. 33A). Die Zweiteilung des Eies liefert einen sehr sonderbaren Anblick, da es nämlich den Eindruck macht, als ob nicht zwei, sondern drei Zellen gebildet würden. Das ist aber unrichtig, denn die dritte Kugel wird erstens nicht ganz abgeschnürt, bleibt vielmehr mittels eines dünnen Stranges immer mit der Zelle CD noch in Zusammenhang und weist zweitens gar keinen Kern auf, ist vielmehr nur ein Sack, in welchen das gesamte Material der hellen Kappe am vegetativen Pol hineingelangt ist. Dieser fälschlich Dottersack genannte Eiteil verschmilzt in der Ruhe wieder mit der Zelle CD, wie in Figur 33 C zu sehen ist. Bei der Vierteilung schnürt sich der Dottersack wieder los (Fig. 33 D) und verschmilzt in der Ruhe mit der Zelle D (Fig. 33 E). Bei der 8-Teilung wird er zum dritten Male abgegliedert (Fig. 33 F) und in der Ruhe wieder der Makromere D zuerteilt, aus der ein großer Teil von ihm bei der 16-Teilung in die Zelle 2d, in den sogenannten ersten Somatoblasten, gelangt Fig. 33 G).

α_2) Entfernung des primären Dottersackes des 2-Zellenstadiums. Sie bewirkt den Wegfall des Apicalorgans und der posttrochalen Region der Trochophora, wie ein Vergleich von Figur 34 A u. B deutlich erkennen läßt. Es ist also in dem Dottersack etwas darin, was mit der Bildung des Scheitelorganes und der posttrochalen Region etwas zu tun hat.

α_3) Die Entfernung des sekundären Dottersackes hat dagegen nicht mehr den Wegfall der Scheitelplatte, wohl aber noch den der posttrochalen Region zur Folge (Fig. 34 C). Daraus schließt Wilson, daß zwischen der ersten und zweiten Furchung Material, das zur Bildung der Scheitelplatte notwendig ist, aus der vegetativen Region in die animale der Zelle CD gelangt. Noch interessanter gestalten sich die Ausfallserscheinungen, die nach Entfernung des Dottersackes eintreten, wenn die Larven aus dottersacklosen Eiern auf Schnitten untersucht werden. Es stellt sich da nämlich

α_4) das Fehlen der Cölomesoblastzellen in den dottersacklosen Larven heraus, wie ein Vergleich von Figur 35 A u. B deutlich zeigt. Diese Beziehung des Dottersackes zur Mesoblastbildung wurde vor Wilson bereits von Crampton am Ilyanassa-Ei festgestellt.

β) Das Resultat aus den Versuchen Wilsons lautet also: Bei Eiern mit lokalisierten Entwickelungsbedingungen oder „organbildenden Substanzen", um die-

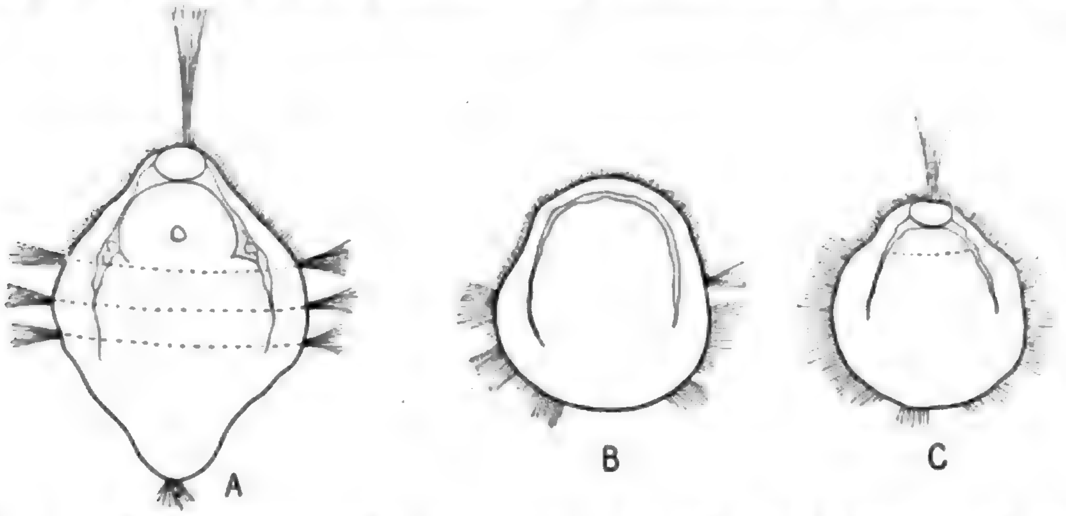


Fig. 34. A normale Trochophora von Dentalium. B Larve nach Entfernung des primären und C nach Entfernung des sekundären Dottersackes. Nach E. B. Wilson.

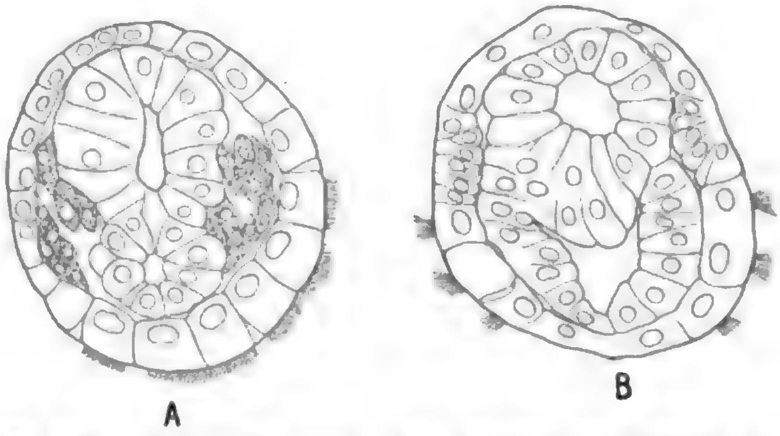


Fig. 35. A Schnitt durch eine normale Trochophora von Dentalium. B Schnitt durch eine Larve, die sich aus dottersacklosem Ei entwickelt hat. Im A zwischen Darm und Körperwand Zellen des Cölomesoblasts (punktiert) vorhanden; in B nicht. Nach E. B. Wilson.

Digitized by Google

sen allgemein eingebürgerten Ausdruck zu gebrauchen, erklärt sich die defekte Entwickelung nach Entfernung von Eiteilen durch das Fehlen gewisser zur Organbildung notwendiger Stoffe.

γ) Vorhandensein von einem gewissen Grad von Regulationsvermögen auf einem gewissen Stadium auch bei Eiern mit lokalisierten organbildenden Substanzen. Dasselbe hat Wilson am unbefruchteten und unreifen Ei von Dentalium, und zwar an amputierten vegetativen Teilen nachgewiesen. Wenn diese Eiteile gar kein Regulationsvermögen besäßen, so müßten an ihnen nach der Befruchtung Dottersäcke entstehen, welche für die Zellen AB und CD viel zu groß wären. Das war aber nicht der Fall, denn die Dottersäcke der sich furchenden vegetativen Eiteile waren in der Regel annähernd, oft jedoch genau proportional verkleinert. Auf diesem Stadium kann also Material, das sonst in den Dottersack gelangt, noch anders verwendet werden. Nach der Befruchtung geht diese Regulationsfähigkeit verloren. Da bei Dentalium die Reifung mit der Befruchtung einsetzt, so haben wir also hier ein Beispiel von der Bedeutung der Reife für die Fixierung „organbildender Stoffe" ihrer Quantität nach vor uns.

δ) Sind die in den Eiern sichtbaren Substanzen als organbildende anzusehen? Nach dem vorigen könnte man versucht sein, alle sichtbaren Einschlüsse in Eiern, wenn dieselben bei ungestörter Entwickelung in bestimmte Furchungszellen hineingelangen, als organbildende Substanzen zu bezeichnen, doch wäre dies, wie sich zeigen wird, vollkommen verkehrt. Die rote Substanz im Strongylocentrotus-Ei braucht nämlich gar nicht immer die typische ringförmige Lage senkrecht zur primären Eiachse zu haben, sondern kann nach den Beobachtungen von Garbowski ganz andere Lagen einnehmen, ohne daß dann von ihr der Entodermbildungsort abhinge. Durch Lyon, Morgan und Lyon und Morgan und Spooner ist außerdem das Pigment im Arbacia-Ei durch starkes Zentrifugieren in jede beliebige Lage zur primären Eiachse gebracht worden, so daß die verschiedensten Teile der aus diesen Eiern sich entwickelnden Plutei pigmentiert waren, und somit auch hier jeder Einfluß dieses Stoffes auf die Orte der Organbildung fehlt. Der rote Ring im Strongylocentrotus-Ei hat also keine organisatorische Bedeutung, wenn man ihn auch in günstigen Fällen mit Boveri als Marke benutzen kann, um bestimmte Organbildungen auf bestimmte Furchungszellen zurückzuführen. Durch starkes Zentrifugieren lassen sich aber auch noch andere Substanzen im Seeigelei ihrem spezifischen Gewicht nach isolieren, aber auch die Lage dieser hat nach den Untersuchungen von Morgan und seinen Mitarbeitern keinerlei Einfluß auf die Orte der Organbildung. Ein unsichtbarer Bau im Cytoplasma ist demnach für letztere verantwortlich zu machen. Ganz das gleiche Resultat ist von F. R. Lillie am Ei des Anneliden Chaetopterus, von Morgan am Ei der Muschel Cumingia und von Conklin an Eiern von Süßwasserpulmonaten erhalten worden. Dem letzteren Forscher gelang es, durch starkes Zentrifugieren in den Eiern dieser Schnecken eine graue, eine helle und eine gelbe Substanz zur Sonderung zu bringen, aber auch hier hatte die Lage dieser Substanzen keinen Einfluß auf das Schicksal der Zellen, welche sie enthielten. In Figur 36 A bis C sind 3 Zweistadien von Lymnaea-Eiern abgebildet,

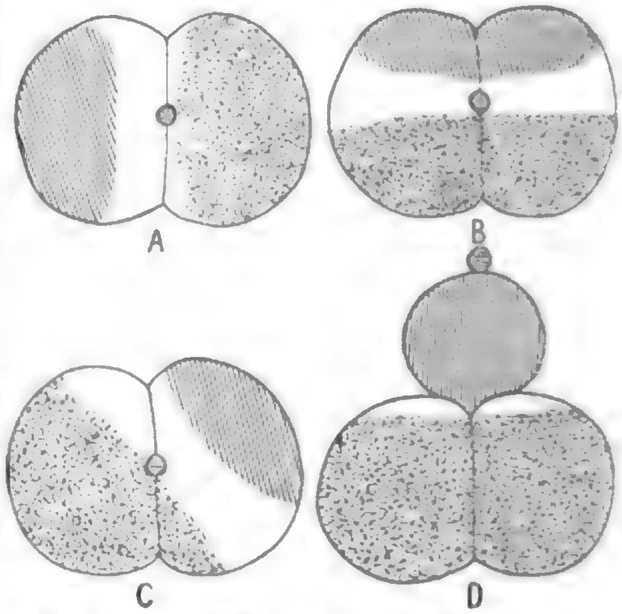


Fig. 36. Anordnung der grauen (schraffiert), der hellen transparenten und der gelben Substanz (punktiert) in den Zweizellenstadien stark zentrifugierter Eier von Lymnaea columella. A, B u. C zentrifugiert nach der Reifung. D zentrifugiert während der zweiten Reifungsteilung. In D ist die graue Substanz in den ganz groß ausgefallenen zweiten Richtungskörper hineingelangt. A—C vom animalen Pole gesehen (Richtungskörper dunkel schraffiert), D von der Seite gesehen. Nach Conklin.

welche nach der Reifung zentrifugiert worden waren. Man sieht in den Zeichnungen auf die primäre Eiachse und den Pol, wo die Richtungskörperchen ausgestoßen worden sind, und konstatiert ohne weiteres, daß die graue, helle und gelbe Substanz die verschiedensten Lagen zur primären Eiachse einnehmen. Die wimpernden Embryonen waren noch genau so gezeichnet, aber trotzdem waren sie und die aus ihnen entstandenen jungen Schnecken normal gestaltet. Infolge

Digitized by Google

Zentrifugierens während der zweiten Reifungsteilung gelangte einmal (Fig. 36 D) die ganze graue Substanz in den sehr groß ausgefallenen zweiten Richtungskörper, doch hatte der Wegfall dieser Substanz keine Defektentwickelung zur Folge. Wenn es also wirklich „organbildende Substanzen" im Mollusken-Ei gibt, so sind dieselben nicht sichtbar und nicht durch Zentrifugieren zu verlagern. Das zeigt die Unvorsichtigkeit des Ausdruckes „organbildende Substanzen", und daß es besser ist, ganz allgemein von an bestimmten Stellen des Zelleibes lokalisierten Entwickelungsbedingungen für bestimmte Organbildungen zu sprechen, denn wir wissen über die organbildenden Substanzen gar nichts, und ein bestimmter physikalischer Zustand wäre zum Auslösen einer bestimmten Organbildung auch genügend.

5c) Auflösung des Unterschieds zwischen Mosaikeiern und Regulationseiern. Heider hat einmal jene Eier, deren isolierte Furchungszellen sich so weiter entwickeln, wie sie sich im Verbande mit den anderen entwickelt haben würden, Mosaikeier, die anderen aber, deren isolierte Zellen Ganzbildungen aus sich hervorgehen lassen, Regulationseier genannt. Die Untersuchungen von Wilson auf der einen und die von Brachet auf der anderen Seite haben nun ergeben, daß ein prinzipieller Unterschied zwischen den beiden Eisorten nicht existiert, daß vielmehr auch in der Entwickelungsgeschichte der Mosaikeier Stadien vorkommen, wo die Eiteile noch äquipotentiell sind. Das gilt sogar von dem Ascaris-Ei, dessen Furchungsstadien ein so typisches Mosaik darstellen, denn es können vom reifen, ungefurchten Ei, wie Miß Hogue gezeigt hat, beim Zentrifugieren große Stücke abgestoßen werden, ohne daß dadurch die Entwickelung des Restes zu einem ganzen kleinen Embryo vereitelt würde, und es hat weiter Boveri beobachtet, daß doppelt befruchtete Eier, die sich simultan in vier Zellen teilen, 2 Zellen AB und 2 Zellen P_1 oder 3 Zellen AB und 1 Zelle P_1 oder endlich 1 Zelle AB und 3 Zellen P_1 bilden können, daß also das Eimaterial in der verschiedensten Weise zur Bildung der zwei verschiedenen Zellenkategorien verwendet werden kann. Diese Tatsachen wie auch gewisse Befunde zur Strassens an Riesen-eiern von Ascaris schließen das Vorhandensein komplizierter organbildender Keimbezirke im ungefurchten Ei dieses Nematoden vollständig aus, und Boveri sagt deshalb mit Recht: „Die Zellstruktur stellt kein Mosaik dar; dieses wird erst gebildet von dem Komplex der selbständig gewordenen Zellen."

Der Unterschied zwischen Mosaikeiern und Regulationseiern kommt also einfach auf einen Unterschied in der Zeit hinaus, in welcher der Komplex der Furchungszellen den Charakter eines Anlagemosaiks erhält. Dieses Mosaik kann einmal dadurch herbeigeführt werden, daß die Furchungszellen allmählich ihre Regulationsfähigkeit in bezug auf die Wiederherstellung der Keimarchitektur einbüßen, andererseits aber auch dadurch, daß im Verlaufe der Furchung bestimmte zur Organbildung notwendige Substanzen nur in bestimmte Zellen gelangen, und daß eine Wiedererzeugung der weggenommenen organbildenden Materialien aus anderen Zellenbestandteilen nicht mehr möglich ist.

5d) Erklärung einzelner Fälle von Entstehung von Defektbildungen aus isolierten Furchungszellen auf Grund der vorstehenden Resultate. α) Die Halbbildungen aus überlebenden Furchungskugeln des in zwei geteilten Ascidieneies sind nur durch den Mangel an Regulationsvermögen zu erklären, da eine einzelne Furchungszelle des Zweizellenstadiums noch alle jene organbildenden Keimbezirke besitzt wie das ganze Ei, nur nicht mehr in bilateralsymmetrischer Anordnung. Es fehlt hier einfach das Vermögen, den Halbeibau zu einem Ganzeibau umzuordnen.

β) Für die Halbbildungen aus überlebenden Furchungszellen in zwei geteilter Ctenophoren-Eier gilt dasselbe; ja, hier besitzen sogar noch die Zellen der 4- und 8-Zellenstadien alle organbildenden Keimbezirke, so daß also sehr wohl aus den isolierten Zellen dieser Stadien kleine ganze Ctenophoren hervorgehen könnten, wenn die isolierten Zellen die Fähigkeit besäßen, ihre Materialien wieder disymmetrisch anzuordnen.

γ) Allgemeines über die Gültigkeit der Erklärung der Entstehung von Defektbildungen aus isolierten Furchungszellen infolge mangelnden Regulationsvermögens. Ganz das gleiche wie für Ascidien und Ctenophoren gilt natürlich für alle jene Eier, deren Furchungszellen bis zu einem gewissen Stadium Teile sämtlicher organbildender Keimbezirke erhalten. Man hätte infolgedessen auch ohne die Resultate Wetzels die Halbentwickelung überlebender erster Blastomeren des Froscheies durch die Unfähigkeit, den Halbeibau zum Ganzeibau umregulieren zu können, erklären müssen, da die erste Furche den bilateralen Eibau im typischen Falle symmetrisch teilt, so daß beide Zellen Anteil an den organbildenden Keimbezirken bekommen, deren Vorhandensein Roux schon in den 80er Jahren an der sichtbar ver-

Digitized by Google

schiedenen Dotteranordnung an der kaudalen und cephalen Seite des Eies erkannt hatte.

δ) Die Erklärung von Defektbildungen durch das Fehlen bestimmter organbildender Substanzen kann, außer bei den Gastropoden- und Scaphopoden-Eiern, auch in jenen Fällen in Frage kommen, wo es sich um Eiteile handelt, deren Abtrennungsfläche nicht durch die primäre Eiachse hindurchgeht, sondern auf dieser senkrecht steht. Wenn z. B. das Ei am animalen Pole eine andere Substanz besitzt, als am vegetativen, so kann das Ausbleiben der Entwickelung rein animaler Stücke einfach daran liegen, daß dieselben nichts von demjenigen Stoff enthalten, von dem die Entstehung der vegetativen Organe abhängig ist. Boveri erklärt so z. B. das häufige Ausbleiben der Gastrulation an Larven aus animalen Achterzellen des Seeigeleies. Selbst dann, wenn man, wie dies neuerdings Boveri auch getan hat, den Eibau so einfach gestaltet sein läßt, daß man die stofflichen Unterschiede am animalen und vegetativen Pol nur durch die Konzentrationsunterschiede eines Stoffes bedingt sein läßt, kann die Defektentwickelung rein animaler Stücke durch das Fehlen einer bestimmten Stoffmenge verursacht sein, denn es ist wohl möglich, daß eine Organbildung von einem Stoff nur dann ausgelöst werden kann, wenn derselbe eine gewisse untere Konzentrationsgrenze nicht unterschreitet. Neben dem Fehlen eines bestimmten Stoffes oder einer bestimmten Stoffmenge würde hier allerdings auch noch die Unfähigkeit hinzukommen, dieses Fehlen irgendwie zu kompensieren. Es kommen nämlich auch Regulationen von Quantitätsverhältnissen vor, wie der folgende Abschnitt zeigen wird.

5e) Die drei verschiedenen Arten von Regulationsvermögen, welche bei der Ganzentwickelung von Bruchstücken von Furchungszellenhaufen anzunehmen sind.

α) Regulation der Architektur der Keimausgangszelle. Diese kommt in Frage, wo die isolierten Furchungszellen von allen organbildenden Keimbezirken etwas bekommen haben. Diese Art von Regulation spielt so lange eine Rolle, als die Furchungsebenen durch die primäre Eiachse hindurchgehen und jeder Zelle von jedem organbildenden Keimbezirk etwas zuerteilen. Bei bilateralen Organismen ist das nur bis zum Zweizellenstadium der Fall, während auf dem Vierzellenstadium, falls hier noch alle 4 Zellen das ganze liefern können, bereits die nächste Art von Regulationsvermögen in Frage kommt. Bei radiären Organismen können dagegen auch noch sämtliche Zellen späterer Furchungsstadien von allen organbildenden Keimbezirken etwas erhalten.

β) Die Art und Weise der Regulation nach Abtrennung von Eistücken senkrecht zur primären Eiachse oder senkrecht zur zweiten ungleichpoligen Achse bei bilateralen Tieren. Schneidet man von einem Ei eine Kalotte am vegetativen Pole fort oder entfernt man auf einem Furchungsstadium die Zellen, welche aus dem vegetativsten Teile des Eies hervorgehen, so kann die Architektur des Restes doch immer noch dieselbe sein wie beim nicht operierten Keim, d. h. der Keim kann, falls ihm Bilateralität von Haus aus zukommt, auch nach der Operation noch zwei ungleichpolige senkrecht aufeinander stehende Achsen besitzen. Trotz alledem ist auch in diesen Fällen nach der Operation eine Regulation notwendig, wie folgende Auseinandersetzungen zeigen werden: Um Klarheit zu erzielen, ist es am zweckmäßigsten, sich auf einen bestimmten hypothetischen Standpunkt zu stellen. Wir lassen die „Anlagen" für jedes Merkmal des Organismus im Kern vorhanden sein und dieselben durch Verschiedenheiten im Eiplasma ausgelöst werden. Diese Verschiedenheit im Eibau in animal-vegetativer Richtung mag einfach darin bestehen, daß, sagen wir, am vegetativen Pole ein Stoff in der Konzentration 100 % vorhanden ist, daß aber die Konzentration desselben nach dem animalen Pole zu immer mehr abnimmt. Bei ungestörter Entwickelung mag nun z. B. am Echinidenkeim die Bildung der primären Mesenchymzellen durch eine Konzentration von 95 bis 100 %, die Entstehung des Urdarmes durch eine solche von 60 bis 95 % und die Bildung des Ektoderms durch Plasmapartien von noch geringerem Gehalt an dem betreffenden Stoff ausgelöst werden. Es kommt nun aber auch, wie wir sahen, primäres Mesenchym und somit das Skelett zur Ausbildung, wenn die vegetative Kalotte mit der Konzentration von 95 bis 100 % entfernt wird. Jetzt muß also die Mesenchymbildung durch eine Konzentration ausgelöst werden, die früher Entodermbildung hervorrief, und für letztere sind Konzentrationen mit verantwortlich zu machen, welche sich im typischen Falle an der Auslösung ektodermaler Bildungen beteiligten. Wir können dieses Verhalten der Blastodermzellen im Experimentalfalle durch folgendes Bild illustrieren, das wir wieder unserer Uhrmacherkolonie entnehmen: In einem Uhrmacherdorf haben sich die einzelnen Uhrmacher aus praktischen Gründen so in die Fabrikation einzelner Uhrbestandteile geteilt, daß die wohlhabendsten unter ihnen jene Teile zu fabrizieren übernehmen, deren

Digitized by Google

Herstellung am meisten Betriebskapital erforderte, und daß die Verteilung der übrigen Bestandteile sich ebenfalls nach ihren Herstellungskosten und dem Kapital der Mitglieder des Konsortiums richtete. Nehmen wir nun an, daß die wohlhabendsten Mitglieder, welche z. B. weiter nichts als goldene Uhrgehäuse machten, starben, und ihr Kapital in andere Orte wanderte, so mußte jetzt die Fabrikation der goldenen Uhrgehäuse von den nächst kapitalkräftigen Mitgliedern übernommen werden, wofür dieselben einen Teil ihrer ursprünglichen Ware an andere zur Herstellung abtraten. Diese Verschiebung kann bei weiterer Verminderung der kapitalkräftigsten Uhrmacher so lange im Interesse der Aufrechterhaltung des Ganzen, des Konsortiums, stattfinden, als immer noch Mitglieder mit dem zur Fabrikation des kostspieligsten Uhrenbestandteiles notwendigen Kapital vorhanden sind. Ich glaube, dieser Vergleich läßt deutlich die Art und Weise der Regulation erkennen, welche bei Abtrennung von Stücken senkrecht zur primären Eiachse notwendig sind, und zeigt außerdem, wie diese Regulationen stets mit Rücksicht auf das Ganze erfolgen.

Es sind im vorstehenden nur die Regulationen vorgeführt worden, die nach Abtrennung von Keimstücken senkrecht zur primären Eiachse notwendig zum Gewährleisten einer Ganzentwickelung sind, es ist aber klar, daß dasselbe mutatis mutandis auch nach Abtrennung von Keimstücken senkrecht zur zweiten ungleichpoligen Achse bilateraler Organismen gilt. Auch hier ist eine regulatorische Verschiebung der Auslösungsareale der einzelnen Organbildungen erforderlich.

γ) Regulatorische Vermehrung und Verminderung bestimmten Baumaterials. Eine dritte Art von Regulation muß bei sogenannten unharmonisch zusammengesetzten Keimbruchstücken angenommen werden, wie sie weiter oben besprochen wurden. Unharmonisch zusammengesetzte Bruchstücke können z. B. bei Echiniden aus sämtlichen 8 Zellen des animalen Poles, dagegen nur aus 2 Makro- und 2 Mikromeren bestehen. Hier sind also alle organbildenden Keimbezirke vorhanden, aber in unharmonischem Verhältnis. Das Endprodukt ist aber harmonsich. Da ist demnach das animale Baumaterial vermindert und das vegetative vermehrt worden. Ganz dieselbe Art von Regulation muß angenommen werden, wenn von einem unreifen Dentalium-Ei ein Teil der vegetativen Eihälfte mit dem ganzen Dottersackareal abgeschnitten wird, und wenn trotzdem dieser vegetative Eiteil nach erfolgter Befruchtung bei der Furchung nicht einen Dottersack von normaler Größe, sondern einen proportional verkleinerten bildet. Auch hier handelt es sich um Regulation der Quantitäten.

B₂. Die Potenzen der Organzellen.

Nachdem im vorstehenden festgestellt worden ist, daß die Furchungszellen vieler Eier bis zu einem gewissen Stadium nach Isolierung noch das Ganze liefern können, und die Gründe namhaft gemacht worden sind, warum dies die Bruchstücke anderer Eier nicht vermögen, ist es jetzt unsere weitere Aufgabe, zu untersuchen, ob etwa nach Ablauf der Furchung auf den frühesten Larvenstadien eine unabänderliche Determinierung der einzelnen Keimbezirke zu bestimmten Teilen des Embryos stattfindet. Es ist Driesch gewesen, der diese Frage an den Larvenstadien der Echiniden zuerst in Angriff genommen hat.

1. Die Versuche von Driesch an Echinodermenlarven. 1a) Versuche auf dem Blastulastadium vor der Mesenchymbildung. Das erste Entwickelungsstadium, welches den Furchungsstadien gegenüber eine äußerlich wahrnehmbare Differenzierung aufweist, ist die wimpernde Blastula. Wird eine solche vor der Mesenchymbildung schräg oder quer zur primären Eiachse durchschnitten, so liefert jedes Teilstück eine vollständige kleine Larve. Nur ganz animale Bruchstücke der Blastula sind wohl auch hier wie bei den Furchungsstadien von dieser Regel ausgeschlossen und liefern Dauerblastulae mit langem unbeweglichen Wimperschopf. Ganz anders fallen dagegen

1b) die Versuche auf dem frühen Gastrulastadium aus. Wird jetzt die Larve quer durchschnitten, so bekommt nur die Larve aus dem vegetativen Teil Darm und Skelett, während die animale zwar auch einen Wimperring und eine Mundeinsenkung erhält, dagegen skelett- und darmlos bleibt (Fig. 37). Wenn also von dem Blastoderm einmal Entoderm gebildet worden ist, vermag das übrig bleibende Blastoderm nach seiner Isolierung von den Larvenbezirk mit Entodermanlage nicht von neuem einen Urdarm zu erzeugen. Das Pendant hierzu liefern

1c) die Versuche mit isolierten Urdärmen, die sich nach Morgan sehr leicht durch Schütteln von ihrer ektodermalen Hülle trennen lassen. Sie bilden kein neues Ektoderm. Und es ist dabei zu berücksichtigen, daß der vegetative Teil der Blastula, aus dem der Urdarm hervorgeht, nach seiner Isolierung nicht nur Mesenchym und Entoderm, sondern auch Ektoderm gebildet haben würde! Ist der im beschreibenden Sinne entodermbildende Bezirk wirklich zum Urdarm geworden, so sind also seine Entwickelungspotenzen beschränkt worden.

Digitized by Google

1d) Die Aequipotentialität der Ektodermzellen des Gastrulastadiums unter sich. Trotz der Beschränkung der Potenzen des Epithels der Gastrula insofern, als das letztere nach Entfernung des Darmes keinen neuen zu bilden vermag, sind aber die Ektodermzellen der Echinodermengastrula untereinander äquipotentiell. Das beweisen die Schicksale der Stücke quer durchschnittener Larven. Figur 37 zeigt nämlich, daß sowohl das animale, wie das vegetative Stück eine Mundeinsenkung gebildet hat, obwohl nur eine hätte entstehen sollen, wenn die Ektodermzellen der Gastrula schon unabänderlich zu bestimmten Leistungen determiniert wären.

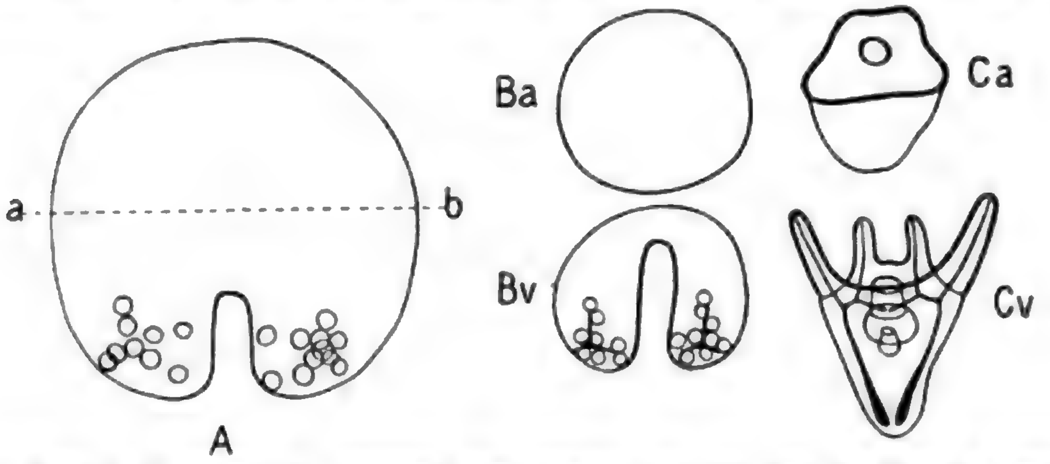


Fig. 37. Ba und Ca zeigen das Schicksal des animalen und Bv und Cv das des vegetativen Teiles der bei a b durchschnittenen jungen Gastrula A. Schema.

1e) Die Aequipotentialität der Entodermzellen unter sich. Ganz das gleiche gilt mutatis mutandis von den Zellen des Urdarmes. Wie Figur 38 zeigt, gehen aus dem freien Ende desselben die Anlagen von Cölom und Wassergefäßsystem in Form zweier Säcke hervor. Schneidet man aber das Ende des Urdarmes mit diesem Cölombezirk ab, so werden trotzdem die beiden Säcke gebildet. Im Urdarm schließt sich an die Vasoperitonealregion jene an, welche den Vorderdarm liefert. Wird auch diese entfernt, so bildet der Rest des Urdarmes trotzdem einen dreigliederigen Darm mit Vorder-, Mittel- und Enddarm. Nach Jenkinson muß freilich der vegetative Rest des Urdarmes ungefähr die Hälfte des normalen betragen, soll diese typische Dreigliederung eintreten. Es sind also auch die einzelnen Bezirke des Urdarmes der Echinodermen noch nicht in unabänderlicher Weise zu bestimmten Organen resp. Organteilen determiniert.

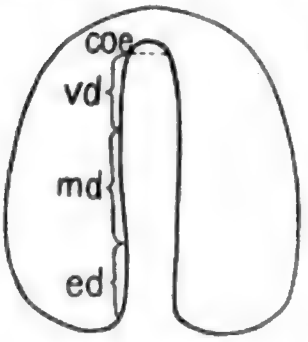


Fig. 38. Echinodermengastrula mit eingezeichneten organbildenden Entodermbezirken. coe Material für Cölom und Wassergefäßsystem, vd für Vorder-, md für Mittel- und ed für Enddarm. Schema.

2. Der Gültigkeitsbereich der ermittelten Tatsachen. 2a) Die Versuche an der Blastula der Nemertinen stammen von E. B. Wilson und seinem Schüler Zeleny her. Der erstere dieser beiden Forscher stellte fest, daß nach Schnittführung senkrecht zur primären Eiachse sowohl der animale, wie der vegetative Teil einen Urdarm erhält, daß aber die Larve aus dem vegetativen Teil fast stets des Apicalorgans entbehrt, und Zeleny erweiterte den Befund dahin, daß dann an der vegetativen Larve das Scheitelorgan fehlt, wenn der animale Teil $^2/_3$, der vegetative nur $^1/_3$ der ganzen Blastula repräsentiert. Obwohl also in bezug auf das Apicalorgan ein gewisser Unterschied zwischen animalen und vegetativen Blastulafragmenten besteht, so kann doch auch bei der Blastula der Nemertinen keine Rede von einer unabänderlichen Determinierung der Blastulabezirke zu bestimmten Organen sein, da animale Teilstücke, wenn sie eine gewisse Größe nicht unterschreiten, doch noch ein Archenteron, und vegetative, wenn sie mehr als $^1/_3$ repräsentieren, auch ein Scheitelorgan erhalten können.

2b) Die Versuche an Tritonlarvenstadien. α) Die Durchschnürung des Blastulastadiums des Triton-Eies hat zuerst Endres (1895) vorgenommen und dabei bisweilen nur aus einer, bisweilen aber auch aus beiden Hälften normale Embryonen erhalten. Spemann bestätigte (1901) diese Tatsache und führte die verschiedene Entwickelung der beiden Hälften darauf zurück, daß die Blastulae in den einzelnen Versuchen nicht immer in gleicher Richtung durchschnürt wurden. In den Fällen, wo aus beiden Hälften eine normale

Digitized by Google

Larve mit Medullarrohr entstand, ist die Blastula nach Spemanns Ansicht in Richtung der Medianebene durchschnürt worden, während in jenen anderen Fällen, wo nur die eine Hälfte einen normalen Embryo, die andere aber bloß ein ovoides Gebilde mit 3 Keimblättern, aber ohne Medullarplatte und Chorda lieferte, die Durchschnürung in einer zur Medianen senkrechten Ebene durchgeführt worden war. Diese Ebene fällt bei Tritonen gewöhnlich mit der ersten Furche zusammen und trennt nach Spemann dorsal von ventral, weswegen er sie als frontal bezeichnet.

β) Frontale Schnürung im Beginne des Gastrulastadiums führt ebenfalls zu einer verschiedenen Entwickelung der beiden Hälften, von denen die dorsale einen normalen Embryo, die ventrale dagegen einen Emb.yo mit Defekten liefert. Solche ventrale Embryonen können z. B. eine schwächere Entwickelung der einen Seite zeigen, die so weit gehen kann, daß man von einem Hemiembryo lateralis reden könnte. Neben einseitigen Defekten können auch zweiseitige und axiale vorkommen, wie das z. B. ein von Spemann beschriebener Embryo beweist, bei dem die beiden Augen fehlten, die beiden Gehörblasen aber vorhanden waren und die Chorda vermißt wurde. Die Urwirbel waren in der dorsalen Mittellinie verschmolzen. Durch die Versuche Spemanns ist für das beginnende Gastrulastadium des Triton-Eies bewiesen, daß die Zellen der einzelnen Keimblätter auch hier noch nicht zu bestimmten Leistungen unabänderlich determiniert sind, obwohl sich die dorsalen und ventralen Hälften nicht genau äquipotent erwiesen.

γ) Quere Durchschnürung der Gastrula nach Schluß des Blastoporus hat zur Folge, daß sich Vorder- und Hinterstück so weiter entwickeln, als ob sie im Verbande geblieben wären. Es erhält also nur das Vorderstück ein Gehirn, das Hinterstück aber nicht.

δ) Die mediane Durchschnürung der Gastrula nach Blastoporusschluß führt dagegen zu einer Verdoppelung des Vorderendes, ein Beweis, daß das Material am Vorderende, obwohl es nach dem vorhergehenden Versuch bereits zur Lieferung des Gehirns determiniert ist, doch noch nicht im einzelnen für ganz bestimmte Gehirnteile spezifiziert ist. Eine solche Spezifizierung erweist sich jedoch als eingetreten, wenn

ε) die mediane Schnürung auf dem Neurulastadium ausgeführt wird, da dann die Verdoppelung des Vorderendes ausbleibt.

ζ) Vergleich der Resultate an Tritonlarvenstadien, mit denen an Echinodermenlarven gewonnenen. Es ist nach dem vorstehenden klar, daß zwischen den Befunden an Entwickelungsstadien des Triton-Eies und denen an Echinodermenlarven eine sehr große Uebereinstimmung besteht. Hier und dort sehen wir, wie mit fortschreitender Entwickelung die Potenzen der Keimblätter und Organanlagen allmählich eingeschränkt werden, wie aber trotzdem die Keimblätter und Organanlagen zunächst in sich noch äquipotentiell sind.

2c) Die Aequipotentialität der Schultergürtelanlage der Amphibien ist ein weiteres schönes Beispiel, daß dieselben Gesetzmäßigkeiten, die man bei niederen Tieren findet, auch bei den Wirbeltieren Geltung haben. Braus schnitt bei Unkenembryonen die Anlage einer vorderen Extremität mit der Anlage des Schultergürtels durch einen kreisförmigen Schnitt heraus und transplantierte die Knospe, welche aus dicht gedrängten Mesodermzellen bestand und noch nicht die Spur von Differenzierung äußerlich zu erkennen gab, an eine andere Körperstelle. Die Folge war, daß sich an der Entnahmestelle aus den zurückgebliebenen Resten der Anlage ein paar Teile des Schultergürtels (Suprascapula mit Cleithrum und ein Stück des Epicoracoides mit angrenzendem Teil der Clavicula) bildete, während an der Implantationsstelle ein vollständiger Schultergürtel mit sämtlichen Teilen, aber in verkleinertem Maßstabe entstand. Hier hatten also die Bezirke des Anlagematerials eine andere Rolle gespielt, als sie gespielt haben würden, wenn bei der Transplantation das Anlagematerial nicht zerteilt worden wäre. Gerade auch das Schicksal der kleineren Reste am Entnahmeort, welche nur Bruchstücke des Schultergürtels erzeugten, hat Pendants unter den Versuchsresultaten bei niederen Tieren. Zerschneidet man z. B. eine Nemertinenblastula senkrecht zu primären Eiachse so, daß das animale Stück klein, das vegetative dagegen groß ausfällt, so bildet das erstere nur eine defekte kleine Larve ohne Darm, das letztere dagegen eine vollständige mit allen Organen aus. Und zerschneidet man eine Echinodermengastrula so, daß der animale Teil nur das distale freie Ende des Urdarmes erhält, so liefert letzteres auch keinen vollständigen dreigliedrigen Darm, wie er in dem vegetativen Bruchstück der Gastrula entsteht. Nur dann kann nach Jenkinson auch das animale Stück einen vollständigen Pluteusdarm erhalten, wenn es mehr als die Hälfte des Archenterons durch den Schnitt zuerteilt erhält.

2d) Die nicht durchgängige Gültigkeit der Beschränkung der Potenzen nach einmaliger Organbildung. Wir hatten oben gesehen, daß das Ektoderm der Gastrula nach Entfernung des Urdarmes

keinen neuen Urdarm zu erzeugen vermag, daß also die Potenzen des äußeren Epithels nach einmaliger Darmbildung beschränkt sind. Es sei hier noch hinzugefügt, daß dieser Satz der Beschränkung der Potenzen nach einmaliger Organbildung von Driesch noch besser am Asteridenurdarm gezeigt worden ist. Schneidet man von demselben die dünne Endblase ab vor Bildung der beiden Cölomsäcke, so werden letztere doch aus anderem Urdarmmaterial gebildet. Schneidet man dagegen das Ende des Urdarms ab, wenn es bereits die beiden zipfelförmig ausgezogenen Cölomsäcke aufweist, so werden letztere von dem Rest des Darmes nicht wieder erzeugt. Dieser Satz erfährt natürlich überall da eine Einschränkung, wo Regeneration vorkommt. Die Tatsache, daß bei Echinodermenlarven der Satz der Beschränkung der Potenzen nach einmaliger Organanlage gilt, beweist übrigens, daß Regeneration und die Erzeugung einer Ganzbildung aus einem Keimbruchstück zwei ganz verschiedene Erscheinungsreihen sind. Die erstere fehlt den Echinodermenlarven, die zweite Eigenschaft kommt ihnen aber in ausgesprochenem Maße zu. Als weiterer Beweis für die notwendige Trennung der beiderlei Regulationserscheinungen von einander kann das Verhalten der Aszidien angeführt werden, welche als ausgebildete Tiere ein geradezu erstaunliches Regenerationsvermögen besitzen, aber trotzdem aus isolierten Furchungszellen Embryonen mit Defekten hervorgehen lassen.

B_3. Die Widerlegung der Hypothese der qualitativ ungleichen Kernteilung als Ursache der Beschränkung der Potenzen.

Im Vorhergehenden war gezeigt worden, daß mit fortschreitender Entwickelung über die Blastulae hinaus eine allmähliche Beschränkung der Potenzen eintritt. Wie kommt diese Beschränkung der Potenzen und die Differenzierung der Keime, mit welcher erstere einhergeht, zustande? Die drei möglichen Antworten auf diese Frage lauten: Die Differenzierung hängt ab vom Kern, vom Cytoplasma oder von allen beiden. Die erstere der drei Möglichkeiten ist von Roux und Weismann vertreten worden. Sie soll zuerst auf ihre Richtigkeit hin geprüft werden.

1. Die Roux-Weismannsche Hypothese von der qualitativ ungleichen Kernteilung. Ursprünglich erklärte Roux die Entstehung von Halbembryonen aus einer überlebenden Blastomere des Zweizellenstadiums des Froscheies durch die Annahme, daß bei der ersten Furchung das Kernmaterial ungleich in solches zur Lieferung einer linken und einer rechten Hälfte geteilt werde. Bei der zweiten Furchung sollte dann das Kernmaterial in solches, das zur Erzeugung von Organen in der vorderen und in solches, das zur Organbildung in der hinteren Körperhälfte notwendig ist, getrennt werden. Diese Zerlegung des Chromatins sollte dann bei den weiteren Teilungen immer weiter geführt werden, bis schließlich in bestimmten Zellen nur ein Kernmaterial vorhanden wäre, das die Entstehung der an die betreffende Stelle gehörenden Organe resp. Organteile ermöglichen würde. Die Furchung hätte also hiernach den Zweck, die komplizierte Architektur des Keimplasmas, welches in den Chromosomen enthalten ist, durch qualitativ ungleiche Kernteilung in einzelne Bausteine zu zerlegen. Dieser Hypothese wurde allerdings gleich zu Anfang eine Hilfshypothese zur Erklärung der Regenerationserscheinungen angefügt: Man ließ sich die qualitativ ungleiche Kernteilung nur auf das aktive Keimplasma erstrecken, während ein bei Regulationen einspringendes Reserveidioplasson qualitativ gleich geteilt werden sollte.

2. Die Widerlegung der Möglichkeit, daß qualitativ ungleiche Kernteilung die erste Ursache der Differenzierung ist, durch den Nachweis der Gleichgültigkeit des Furchungsmodus für den Entwickelungsablauf. Wenn bei der Furchung das Kernmaterial qualitativ ungleich verteilt würde, so würde das richtige Kernmaterial nur dann in das richtige Cytoplasmaareal zu liegen kommen, wenn die Furchung absolut normal, typisch im Sinne Roux's, verliefe. Nur dann dürften auch normale Embryonen entstehen, während sonst Mißbildungen aus den Eiern hervorgehen müßten. Das hat schon Roux im Jahre 1885 klar erkannt. Er wußte auch, daß ein abweichendes zeitliches Auftreten der beiden ersten Furchen keine nachteiligen Folgen für die Weiterentwickelung hat, und fügte deshalb seiner Ansicht von der qualitativ ungleichen Kernteilung die Hilfsannahme hinzu, daß bei Furchungsanachronismen die Qualität des Cytoplasmas an den beiden Spindelpolen die Qualität des Chromatins bestimmt, welches bei der Kernteilung den betreffenden Eibezirken zuerteilt wird. Steht die Spindel senkrecht zur Symmetrieebene des Eies, sind also die beiden Spindelpole von gleichbeschaffenem Plasma umgeben, so wird das Kernmaterial qualitativ halbiert, d. h. in solches zur Lieferung einer linken und ein solches zur Erzeugung einer rechten Körperhälfte geteilt, hat sich aber die Spindel mit ihrer Längsachse in der Symmetrieebene eingestellt, so befinden sich die beiden Spindelpole in verschiedenem Plasma, und ist eine qualitativ ungleiche Verteilung des Kernmaterials in solches zur Lieferung einer hinteren und in solches für

Digitized by Google

eine vordere Körperhälfte die Folge. Man sieht daraus, daß sich **Roux** schon angesichts der Furchungsanachronismen dem logischen Zwange unterworfen fühlte, als erste Ursachen der Differenzierungen Plasmaverschiedenheiten in Anspruch zu nehmen, wenn er diese Ansicht zunächst auch noch mit der Hypothese von der qualitativ ungleichen Kernteilung vereinigte. Einen noch viel größeren Zwang, die qualitativ ungleiche Kernteilung als erste Ursache der Differenzierung zu verwerfen, üben nun aber die Versuche von **Driesch** aus den Jahren 1892 und 1893 aus, bei denen derselbe durch Einwirkung von Wärme und von verdünntem Wasser nicht nur zeitliche Verschiebungen von Furchungsebenen erzielte, sondern überhaupt den ganzen Furchungsmodus total abändern konnte, so daß manche Zellenkategorien ganz oder teilweise in Wegfall kommen konnten, ohne daß dadurch die Entstehung von normalen Larven vereitelt worden wäre.

3. Die Widerlegung der Möglichkeit, daß qualitativ ungleiche Kernteilung die erste Ursache der Differenzierung ist, durch die Druckversuche von Driesch. Um zu prüfen, ob bei der Furchung eine qualitativ gleiche oder ungleiche Verteilung des Kernmaterials stattfindet, bediente sich **Driesch** einer Methode, welche **Pflüger** vorher zu ganz anderen Zwecken angewandt hatte: Er preßte die sich furchenden Eier zwischen Objektträger und Deckglas. Das hatte zur Folge, daß sich die Eier abplatteten, und daß sich die Kernspindeln gemäß der **Hertwig**schen Regel in dem größten Durchmesser, also parallel zu den drückenden Platten einstellten. Bei der dritten Teilung erhält man infolgedessen 8 Zellen, welche nicht in 2 Kränzen zu je 4 übereinander, sondern welche in 2 Reihen zu je 4 nebeneinander liegen. Wie auf diese Weise die Kerne vertauscht werden, läßt sich am besten anschaulich machen, wenn wir unseren Betrachtungen ein **Strongylocentrotus**-Ei mit rotem Ring an der vegetativen Hemisphäre zugrunde legen, das senkrecht zur primären Eiachse flach gepreßt worden ist. Wäre die Hypothese von der qualitativ ungleichen Verteilung des Kernmaterials richtig, so würde bei der 8-Teilung des Echinideneies ektodermales Kernmaterial von jenem getrennt werden, das in das Ento- und das Mesoderm hineingelangt. Schickt sich das Vierzellstadium (Fig. 39 A) unter Druck zur 8-Teilung an, so ist die Folge, daß die Zellen mit den Ektodermkernen neben die mit dem Ento-Mesodermmaterial zu liegen kommen, wie dies Figur 39 B von der Fläche und Fig. 39 C von der Seite zeigen. Wir heben nunmehr den Druck auf. Die flachen Zellen runden sich infolgedessen wieder ab und die Spindeln für die 16-Zellenteilung

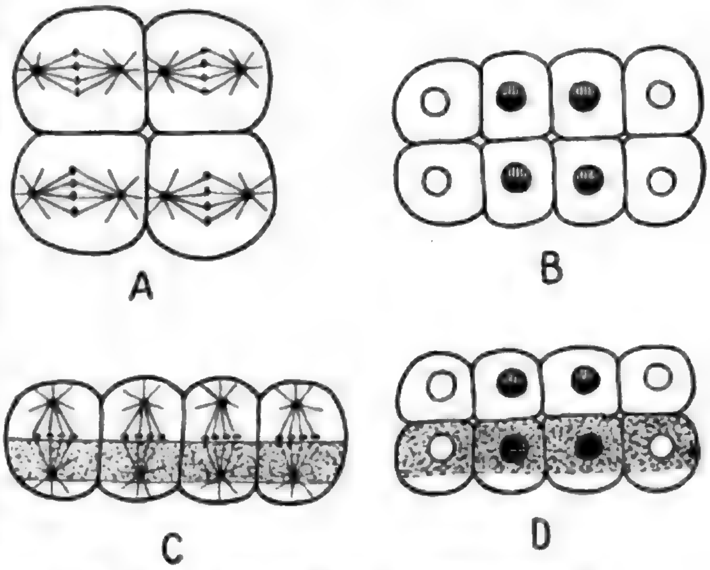


Fig. 39. A—D Schemata zur Erläuterung der Verlagerung der Kerne in Eiern, die bis zum 8-Zellenstadium senkrecht zur primären Eiachse flach gedrückt wurden. A 4-Zellenstadium im Beginne der Teilung in 8 Zellen. Die Spindeln sind parallel zu den drückenden Platten angelegt. B 8-Zellenstadium von der Fläche gesehen. Ektodermkerne hell, Ento-Mesodermkerne schraffiert. C 8-Zellenstadium von der breiten Seite gesehen nach Aufhebung des Druckes. Die Spindeln zur 16-Teilung senkrecht zu der ursprünglichen Lage der drückenden Platten angelegt. D 16-Zellenstadium nach Aufhebung des Druckes von der breiten Seite gesehen wie C. Ektodermkerne hell, Ento-Mesodermkerne schraffiert, und zwar die eine Kernhälfte einfach und die andere doppelt wie in B. Skelettbildnerkerne doppelt schraffiert.

stellen sich jetzt senkrecht zur ursprünglichen Richtung der drückenden Platten ein. Die 16 Zellen liegen also in 2 Schichten zu je 8 übereinander. Wenn das normale 8-Zellenstadium sich in 16 Zellen teilt, so würde, die Richtigkeit der **Roux-Weismann**schen Hypothese vorausgesetzt, das ektodermale Kernmaterial der animalen Zellen wieder ektodermales abspalten, während das Entomesodermmaterial der vegetativen Hemisphäre das Chromatin für die Mikromeren, d. h. für die Skelettbildner, abgibt. In unserem Experimentalfalle kommt infolgedessen ektodermales Kernmaterial in vegetatives und entomesodermales in animales Plasma zu liegen, wie die Seitenansicht des 16-Zellenstadiums in Figur 39 D erkennen läßt. Die Figur zeigt außerdem, daß dann, wenn die hellen vegetativen Kalotten abgetrennt, also die Skelettbildner abgegliedert werden, nur in einen Teil der letzteren das richtige Kernmaterial, in die anderen dagegen ektodermales hineingelangt. Und alle jene Zellen mit dem roten Ring, welche nach dem deskriptiven Befund den Urdarm liefern, werden überhaupt kein richtiges Kernmaterial erhalten, sondern ektodermales

und solches, welches in die Skelettbildner hineinkommen sollte! Hinge die Differenzierung von einer qualitativ ungleichen Kernteilung ab, so müßten aus solchen Keimen mit durcheinander gewürfeltem Kernmaterial die sonderbarsten Mißbildungen entstehen. Die Larven fallen aber ganz normal aus. Deswegen kann die Hypothese von der qualitativ ungleichen Kernteilung nicht richtig sein, und ist die erste Möglichkeit der Erklärung der allmählich eintretenden Beschränkung der Potenzen ausgeschlossen. Die Drieschschen Versuche sind von E. B. Wilson am Nereis- und von Oscar Hertwig am Froschei mit ganz demselben Resultat wiederholt worden. Auch die neuen Experimente von Dederer am Cerebratulus-Ei lieferten ähnliche Ergebnisse wie diejenigen am Echiniden-Ei, und schließlich lassen sich auch die Morganschen Druckversuche aus der neuesten Zeit am Ciona- und Nereis-Ei nicht als Beweise für die Richtigkeit der qualitativ ungleichen Kernteilung als Ursache der Differenzierung benutzen.

4. Plasmaverschiedenheiten als Ursachen von Differenzierungen und Beschränkung der Potenzen. Da in den Druckversuchen von Driesch nur die Kerne durcheinander geworfen wurden, der Eibau aber trotz Deformation im Prinzip unverändert blieb, so konnte man nach Ausschluß der ersten Möglichkeit schon ahnen, daß die zweite das Richtige trifft, d. h. daß die Differenzierung dadurch eingeleitet wird, daß in den verschiedenen Furchungszellen verschiedene Partien des Ooplasmas eingeschlossen werden. Das ist nun in der Tat durch

4a) die Experimente von Driesch und Morgan am ungefurchten Ctenophoren-Ei bewiesen worden. Nach ihren Versuchen über die Entwickelung isolierter Furchungszellen, bei denen also den Keimen Kern- und Plasmamaterial genommen worden war, stellten die beiden Forscher auch Zerschneidungsversuche an ungefurchten befruchteten Ctenophoren-Eiern an, durch die ein Teil des Ooplasmas, aber kein Kernmaterial entfernt wurde. Sie erhielten aus den operierten Eiern dreierlei Kategorien von Larven: Erstens 2 kleine Larven ohne Rippen und Magen, die sich gerade aus dem kleinen abgeschnittenen Stück entwickelt hatten, während das große zerfiel. Die beiden Forscher schließen daraus, daß nur das kleine kernhaltig war, daß also der Schnitt hier die kleine animale Kalotte mit dem peripher gelegenen Eikern abgetrennt hatte (Fig. 40 Schnittrichtung a-b). Die zweite Kategorie bestand aus normalen Larven mit 4 Entodermtaschen und 8 Rippen. Hier soll der Schnitt senkrecht zur Eiachse geführt worden sein und einen Teil der vegetativen Hemisphäre entfernt haben (Schnittrichtung i-k). Drittens endlich kamen Larven mit deutlichen Defekten zur Beobachtung. Sie besaßen nur 6, 5 oder 4 Rippen, wiesen auch Verlagerung und unvollständige Ausbildung von Rippen auf und hatten meist auch weniger als 4 Magentaschen. Driesch

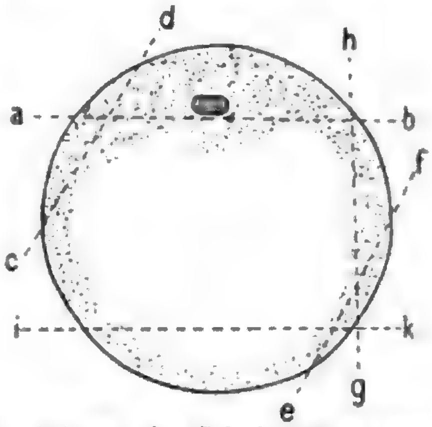


Fig. 40. Schema der Schnittführung am Ctenophorenei. Bis auf eine Abänderung nach Fischel.

und Morgan meinen, daß in diesem Falle seitliches Ooplasma abgeschnitten worden sei, eine Deutung, die deshalb berechtigt war, weil sie aus Zweistadien, deren eine Zelle seitlich angeschnitten worden war, solche Larven mit defekten Rippen erhalten hatten. Die Auslegung der Entstehungsart normaler Larven aus angeschnittenen Eiern wurde von H. E. Ziegler und von Fischel bestätigt, die beide die Eier erst anschnitten, nachdem die erste Furche am animalen Pole ins Ei einzuschneiden begonnen hatte, wodurch eine genaue Schnittführung ermöglicht wurde. Fischel bestätigte dann auch die Zurückführung der defekten Larven auf seitlich angeschnittene Eier und wies nach, daß der seitliche Schnitt seitlich oben (Schnittrichtung c-d) oder höchstens rein seitlich (g-h), aber nicht seitlich unten (e-f) geführt werden darf, sollen Defekte an den Rippen auftreten. So war also sicher bewiesen, daß die Entnahme eines bestimmten Eibezirkes die Störung der Entwickelung bestimmter Organe zur Folge hat, auch wenn das gesamte Kernmaterial vorhanden ist. Die grundlegende Arbeit von Driesch und Morgan bildet den Ausgangspunkt für alle Arbeiten, welche die Bedeutung des Eibaues für die Ausdifferenzierung der Keime zu ermitteln suchten. Hier sind an erster Stelle zu nennen:

4b) Die Experimente von Crampton am Ilyanassa-Ei und die von E. B. Wilson am Ei von Dentalium. Durch Entfernung einer bestimmten Plasmapartie, des sogenannten Dottersackes, konnte auch hier der Ausfall bestimmter Bildungen herbei-

Digitized by Google

geführt werden, wie weiter oben bereits eingehend geschildert wurde.

4c) Beseitigung eines Einwandes gegen die Bedeutung der Plasmaverschiedenheiten für die Differenzierung der Keime. Aber in einem Falle scheint doch sicherlich bewiesen, daß die Ausdifferenzierung durch eine qualitative Kernteilung eingeleitet wird; zeigt das nicht das von Boveri entdeckte verschiedene Verhalten der Kernsubstanzen in den somatischen und Propagationszellen von Ascaris megalocephala, das oben näher geschildert wurde? Es ist auf diese Frage zu erwidern, daß Boveri selbst an der Hand doppelt befruchteter Eier sicher nachgewiesen hat, daß von vornherein nicht bestimmte Chromosomenspalthälften zur Diminution determiniert sind, sondern daß die Diminution der Chromosomen vom Plasma abhängig ist, in welches sie zu liegen kommen. Auch hier geht also die Differenzierung vom Plasma aus, obwohl die Kerne, wenigstens die von Soma- und Geschlechtszellen, dann ebenfalls verschieden werden.

4d) Der Widerstreit des im vorigen erhaltenen Resultates mit der Ansicht, daß der Kern das wesenbestimmende Element der Zelle ist, und die Lösung dieses Widerstreites. Steht nun aber unser Resultat, daß die Differenzierung vom Zellplasma abhängig ist, nicht in Widerspruch zu der allgemein verbreiteten Anschauung, daß der Kern das wesenbestimmende Element der Zelle ist? Die Antwort lautet, daß dieser Widerspruch nur ein scheinbarer ist, da sich beide Anschauungen auf sehr einfache Weise durch eine Hypothese vereinigen lassen. Wir brauchen nämlich nur die Rouxsche Ansicht von der Beeinflussung der Qualität der Kernteilung durch die Qualität des Plasma ihres einen Bestandteiles zu entkleiden und erhalten dann eine Hypothese, welche von Driesch 1894 in seiner Theorie der organischen Entwickelung ausgesprochen worden ist: Eine bestimmte Plasmabeschaffenheit wirkt auf den Kern ein und aktiviert aus demselben einen bestimmten Stoff, nach Drieschs damaliger Auffassung ein Ferment, das nun wiederum bestimmte Prozesse im Zellleib ins Leben ruft. Das primäre, welches Differenzierung auslöst, ist also doch das Zellplasma, obgleich dann die Veränderung des letzteren vom Zellkern aus bestimmt wird. Diese Lösung des Widerstreites scheint in der Tat die einzig richtige zu sein. Sie gewinnt infolgedessen immer mehr an Boden und wird vor allen Dingen auch von Boveri vertreten, der durch das Studium des Schicksals doppelt befruchteter Eier weiter in die Konstitution des Zellkernes einzudringen und mit Erfolg nachzuweisen versuchte, daß sich aus den einzelnen Chromosomen des Zellkernes nicht alle Organbildung hervorrufenden Stoffe aktivieren lassen, sondern nur ein Teil, daß also die einzelnen Chromosomen nicht gleichwertig, sondern essentiell verschieden sind. An anderer Stelle dieses Werkes wird man Eingehenderes über die qualitative Verschiedenheit der Chromosomen auffinden (vgl. den Artikel „Zelle“).

B₄. Das Verschmelzen von zwei Ganzkeimen zu einem einheitlichen Großkeim.

1. Die Verschmelzung von Eiern. Die Rieseneier bei Ascaris megalocephala wurden zuerst von Sala gesehen und später von zur Strassen außerordentlich eingehend untersucht. Nach letzterem Forscher können sowohl unbefruchtete wie auch befruchtete und beschalte Eier miteinander verschmelzen. Einheitliche Riesenindividuen entstehen aber nur, wenn vor der Befruchtung verschmolzene Eier monosperm befruchtet werden. Zur Strassen konnte die Entwickelung eines Riesen vom ungeteilten Doppelei bis zum völlig ausgebildeten, munter in seiner Sanduhrschale sich schlängelnden Wurm beobachten. Es muß allerdings betont werden, daß zur Strassen nicht willkürlich das Verschmelzen von Eiern herbeiführen konnte, sondern daß er nur Befunde analysierte und beschrieb, die ihm die Natur selbst darbot. Er schließt mit Recht aus seinen Beobachtungen, daß der Eibau des Nematodeneies, das eine so typische Mosaikfurchung zeigt, doch nicht kompliziert, sondern nur einfach beschaffen sein kann, da sonst nicht zwei Eier zu einem einheitlichen Gebilde zusammenfließen könnten.

Auch bei dem Seeigel Sphaerechinus granularis kommen gelegentlich Rieseneier von doppelter Größe vor, welche durch Verschmelzung von 2 einzelnen Eiern von normaler Größe innerhalb des Ovariums entstanden sein dürften.

2. Die Verschmelzung von Keimen auf frühen Entwickelungsstadien. Auch diese kommt vor und kann zu sehr verschiedenen Bildungen Veranlassung geben:

2a) Die Entstehung von Larven mit einheitlichem Ektoderm, mit kommunizierender primärer Leibeshöhle, aber mit doppelten inneren Organen. Solche Larven haben verschiedene Forscher bei Echiniden erhalten: Herbst in Seewasser von abnormer chemischer Zusammensetzung, Morgan nach Schütteln der Eier und sehr zahlreich Driesch bei seinen Verschmelzungsversuchen, die er bald nach seinen Isolationsexperimenten mit Furchungszellen unternahm, die aber erst 1900 mit Erfolg gekrönt wurden. In Figur 41 ist eine solche Larve abgebildet. Driesch

Digitized by Google

verwandte zu seinen Versuchen verschiedene Methoden, von denen die erfolgreichste folgende war: die befruchteten und ihrer Membranen beraubten Eier kamen auf kurze Zeit in kalkfreies Seewasser, das durch NaOH-Zusatz alkalisch gemacht worden war, und wurden dann in gewöhnliches Seewasser zurückgebracht. Die Hauptrolle beim Gelingen des Versuches spielt

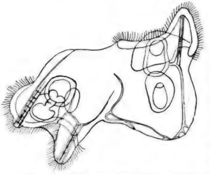


Fig. 41. Zwei verwachsene Sphaerechinus-Plutei, aus zwei ganzen Keimen durch Verschmelzung entstanden. Nach Driesch.

allerdings die individuelle Beschaffenheit des verwendeten Materials.

2b) Die Prädominanz eines Individuums auf Kosten des anderen. Es kann vorkommen, daß die Entwickelung eines Individuums mehr oder weniger gehemmt wird, und daß sich dafür das andere umso mächtiger entwickelt. Die Prädominanz erstreckt sich in erster Linie auf das Skelett und in zweiter auf den Darm. Sowohl Morgan, wie Driesch haben solche Larven beobachtet, und letzterer Forscher hat bei Echinus microtuberculatus festgestellt, daß da die Prädominanz des einen Individuums so weit gehen kann, daß das andere nur noch als kleiner unorganisierter Anhang an dem großen dominierenden Individuum erscheint. Figur 42 A zeigt ein Verschmelzungsprodukt von Sphaerechinus mit Prädominanz eines Individuums und Figur 42 B ein solches, wo das zweite nur noch an einer Deformation am Scheitelteil des großen Einheitspluteus von Echinus sichtbar ist.

2c) Die Verschmelzung paralleler Därme zu einem Einheitsdarm. Wir haben dieselbe schon einmal oben geschildert, als es sich um Regulationserscheinungen bei Verwachsungszwillingen handelte. Wenn dann gleichzeitig die eine Skelettanlage dominiert, so kommt auch äußerlich eine große Einheitsbildung zustande. Auf diese Weise hat zuerst Morgan eine einheitliche Riesenbildung erhalten und auch Driesch stieß bei seinen Versuchen fünfmal auf solche Fälle.

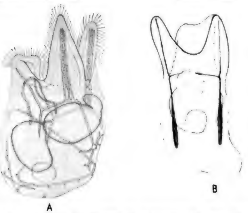


Fig. 42. A Verwachsungsobjekt von Spaerechinus mit starker Prädominanz eines Individuums; vom zweiten nur Mittel- und Enddarm und Skelettrudimente sichtbar. B Verwachsungsobjekt von Echinus mit so starker Prädominanz eines Individuums, daß der Rest des zweiten nur noch als ein kleiner Auswuchs am Scheitelteil des großen Einheitsriesen erscheint. A und B nach Driesch, B sehr schematisch.

2d) Einheitsentwickelung vom Blastulastadium an kommt nun aber ebenfalls vor. Das ist zuerst von Driesch 1900 nachgewiesen worden. In diesen, übrigens nicht häufigen Fällen entsteht gleich von Anfang an nur eine Darm- und eine Skelettanlage. Es resultieren daraus Riesenembryonen von doppelter als normaler Größe, wie die Figuren 43A und B erkennen lassen. Diese und die unter 2c mitgeteilten Tatsachen lehren, daß unter Umständen ein ganzer Keim auch die Rolle einer Hälfte spielen kann, während natürlich die Einheitsbildungen, welche auf die unter b geschilderte Art und Weise entstehen, nicht in dieser Richtung zu

Digitized by Google

verwerten sind. In diesen Fällen kommt die Riesenbildung anders zustande als so, daß ein Ganzes die Rolle einer Hälfte über nimmt.

2e) Die Bedingungen für die Entstehung von Verwachsungszwillingen oder einheitlichen Riesenbildungen aus verschmolzenen Keimen sind bis jetzt noch nicht bekannt. Boveri meinte, daß letztere nur dann entstehen können, wenn die Blastulae mit parallelen primären Eiachsen verschmelzen, doch zeigen die von Driesch bei Echinus beobachteten Tatsachen, daß einheitliche Riesen durch Vergrößerung eines Individuums auf Kosten des anderen auch entstehen können, wenn die Verschmelzung nicht mit parallelen Achsen stattgefunden hat.

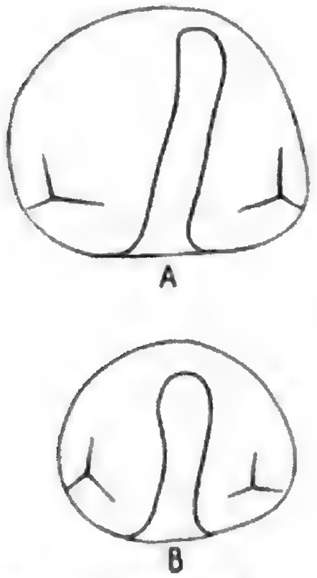


Fig. 43. Normale (B) und Riesengastrula (A) von Sphaerechinus; durch Verschmelzung aus zwei Keimen entstanden.

2f) Die Entstehungsmöglichkeit von Doppelbildungen durch Verwachsung zweier ganzer Embryonen ist natürlich auch durch die Drieschschen Versuche bewiesen. Es brauchen also nicht alle Verwachsungszwillinge auf unvollständiger Spaltung von Keimen zu beruhen.

B₅. Präformation und Epigenese.

In den beiden letzten Abschnitten, welche über das Determinationsproblem handeln, sollen noch zwei Fragen von allgemeiner Bedeutung besprochen werden, auf welche die Zerteilungsversuche an Furchungs- und Larvenstadien ein Licht geworfen haben. Zunächst sei die Frage erörtert, inwieweit die gewonnenen Resultate für eine evolutionistische und inwieweit sie für eine epigenetische Entwickelung sprechen. Daß Evolution im alten Sinne während der Embryonalentwickelung nicht existiert, ist freilich schon längst durch Kaspar Friedrich Wolff widerlegt worden: Im einfachen beschreibenden Sinne gibt es Produktion von Mannigfaltigkeit (Epigenesis) während der Embryonalentwickelung: letztere ist nicht einfach Wachstum von en miniature vorgebildeten Teilen (Evolution). Etwas anderes ist es aber, wenn man mit Roux die Frage so formuliert: Gibt es während der Ontogenese „wirklich Produktion von Mannigfaltigkeit“ oder „bloße Umbildung von nicht wahrnehmbarer Mannigfaltigkeit in wahrnehmbare, sinnenfällige“? Sind am Anfange der Entwickelung ebenso viele materielle Verschiedenheiten wie am Ende vorhanden oder nicht? So kann man den Gegensatz zwischen Neoevolution und Neoepigenesis auch ausdrücken. Es muß gleich von vornherein gesagt werden, daß die neueren Ergebnisse der experimentellen Morphologie gar kein Licht auf diese Frage geworfen haben. Nur dann, wenn man mit einer neoevolutionistischen Ansicht die spezielle Hypothese von Weismann vertritt, daß das Keimplasma, welches alle künftigen Mannigfaltigkeiten der Anlage nach enthält, durch die Furchung in einzelne qualitativ verschiedene Mosaiksteinchen zerlegt wird, nur dann hat man die Resultate der experimentellen Morphologie gegen sich. Eine ganze Anzahl von Forschern hat sich zwar in neuerer Zeit an eine neoepigenetische Auffassung der Embryonalentwickelung gewöhnt, indem sie annehmen, daß im Laufe der Entwickelung durch die gegenseitige Beeinflussung der einzelnen Teile die Mannigfaltigkeiten vermehrt werden, doch stiegen schon Herbst, als er seine Theorie der formativen Reize ausarbeitete und als er näher über diesen Punkt nachdachte, Zweifel an der Richtigkeit dieser Ansicht auf, und hält es neuerdings Driesch sogar aus logischen Gründen für unmöglich, daß ein sich selbst überlassenes System auf Grund seiner chemischen und physikalischen Faktoren seine Mannigfaltigkeit erhöhen könne. Ohne äußere Einwirkung kann es in einem solchen System auf Grund seiner materiellen Faktoren nach ihm nur eine andere Verteilung, eine Umwandlung und eine Verminderung von Mannigfaltigkeiten geben, aber keine Vermehrung.

B₆. Das harmonisch-äquipotentielle System und die Autonomie der Lebensvorgänge.

Die Untersuchungen über die Potenzen der Organzellen sind für Driesch der Ausgangspunkt für seine Lehre von der Autonomie der Lebensvorgänge, für seine vitalistische Auffassung der Entwickelungsphänomene, geworden. Da Driesch seine Anschauungen nur als letzte Konsequenzen der bisher geschilderten Resultate der experimentellen Entwickelungsgeschichte ansieht, müssen wir auf dieselben hier zu sprechen kommen, wogegen eine Schilderung der vitalistischen Ansichten anderer Autoren, welche andere Ausgangspunkte haben, nicht hierher gehört, denn der Artikel soll nicht über Mechanismus und Vitalismus handeln.

1. **Der Echinidenurdarm als harmonisch-äquipotentielles System und die Definition des letzteren.** In Figur 44 A

Digitized by Google

haben wir eine Gastrula vor uns, an deren linker Urdarmseite die organbildenden Entodermbezirke eingetragen sind. Wir nehmen an, daß das sekundäre Mesenchym bereits aus dem freien Ende des Urdarmes ausgetreten ist, daß also die erste weitere Differenzierung in der Bildung der beiden Cölomsäcke besteht. Die Larve wird nun in der Mitte durchgeschnitten. Es entwickelt sich dann das vegetative Teilstückchen — wie wir bereits sahen — zu einer kleinen Pluteuslarve mit dreiteiligem Darm. Zeichnen wir jetzt für den kleinen vegetativen Darmrest die organbildenden Entodermbezirke ein, wie das auf der rechten Seite geschehen

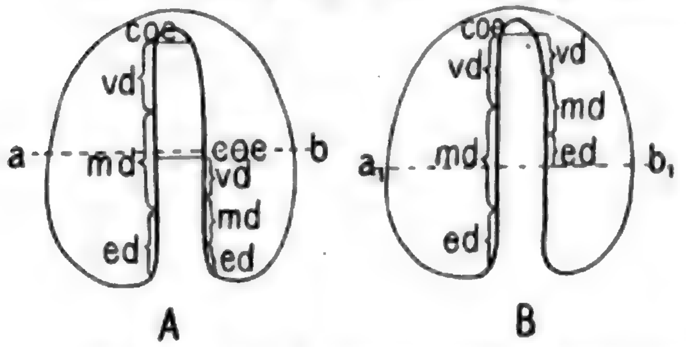


Fig. 44. A und B Schemata zur Demonstrierung des verschiedenen Schicksals der gleichen Entodermbezirke nach verschiedener Schnittführung durch Echinodermengastrulae.

ist, so sieht man, daß jetzt die Cölomblasen aus Material hervorgehen, das sich im Normalfalle an der Bildung des Mitteldarmes beteiligt hätte, und daß der Vorderdarm jetzt aus Mitteldarm- und der Mitteldarm aus Enddarmzellen hervorgeht. Gerade umgekehrt kann aber auch Mitteldarmmaterial den Enddarm liefern und Vorderdarmmaterial sich an der Bildung des Mitteldarmes beteiligen, wenn wir die Entwickelung des animalen Teilstückes der Gastrula (Fig. 44 B) weiter verfolgen und den Schnitt etwas unterhalb der Mitte führen, da der distale Darmabschnitt nach Jenkinson sonst nicht dreigliederig wird. Die organbildenden Entodermbezirke können sich somit an allen möglichen Leistungen beteiligen, welche das Gesamtsystem überhaupt zu leisten vermag. Dieser Satz erfährt nur an den beiden Enden des Urdarmes eine Einschränkung, denn einmal ist es schon wegen der Kleinheit des Cölomsackbezirkes ausgeschlossen, daß derselbe sich unter bestimmten Umständen auch an der Bildung des Mitteldarmes oder gar des Enddarmes beteiligen könnte, und sodann kann auch das normale Enddarmmaterial im Experimentalfalle nicht alles liefern, was der ganze Urdarm zu liefern vermag, wenn es auch mehr als Enddarm aus sich hervorgehen läßt. Es hieße aber das wesentlichste übersehen, wollte man dem Urdarm der Echinodermen infolge dieser Einschränkung den Charakter eines harmonisch-äquipotentiellen Systems absprechen, denn Tatsache ist, daß das Material, welches in der Norm den Mitteldarm liefert, in Experimentalfällen auch Cölomsäcke, Vorderdarm oder Enddarm aus sich hervorgehen lassen kann. Trotzdem nun aber die organbildenden Entodermbezirke nicht nur eine bestimmte Leistung, sondern mehrere oder sogar alle Leistungen zu vollführen vermögen, welche überhaupt in der Potenz des ganzen Systems liegen, so leistet doch jeder Bezirk im einzelnen Falle immer nur etwas Bestimmtes und nicht mehreres zugleich, so daß also das Geschehen in den einzelnen Bezirken zueinander in Harmonie steht, und nicht ein wüstes Konglomerat, sondern ein normales Endresultat die Folge ist. Der Echinodermenurdarm ist demnach nicht nur ein äquipotentielles, sondern ein harmonisch-äquipotentielles System.

Ein harmonisch-äquipotentielles System ist also ein solches, dessen Elemente — mit gewissen Einschränkungen an den Polen — alles einzelne, was zur Potenz des Systems überhaupt gehört, gleichermaßen leisten können, bei dem aber trotzdem das Geschehen harmonisch ineinander greift.

2. Aufzählung anderer harmonisch-äquipotentieller Systeme. 2a) Das ungefurchte Echinidenei. Wir sahen früher, daß die organbildenden Keimbezirke desselben nicht zu bestimmten Leistungen determiniert sind, sondern mit gewissen Einschränkungen sich an allen Bildungen beteiligen können, deren Erzeugung überhaupt in der Potenz des ganzen Systems inbegriffen ist. Wollte man wegen der Potenzbeschränkung von animalen Bruchstücken sagen: „Der Seeigelkeim ist nichts weniger als ein äquipotentielles System" (Boveri 1901), so würde man die wichtige Tatsache übersehen, daß es im Echinidenei Regionen gibt, die sich je nach Umständen an der Bildung des primären Mesenchyms, an der Bildung des Darmtraktus oder am Ektoderm beteiligen können.

2b) Das Ektoderm der Echinodermenlarven. Den Beweis, daß auch das Ektoderm der Echinodermengastrula ein harmonisch-äquipotentielles System ist, liefert die Tatsache, daß von einer quer durchschnittenen Gastrula nicht nur der animale, sondern auch der vegetative Teil eine Mundeinsenkung bildet.

2c) Der Tubulariastamm. Schneidet man aus einem Tubulariastamm ein Stück heraus, so sieht man nach einiger Zeit an ihm in einiger Entfernung von der oralen Schnittfläche in Form von Längswülsten die Anlagen der kleinen Rüsseltentakeln auftreten, hinter denen sich ein zweiter Kranz von längeren Längswülsten, die

Digitized by Google

Anlagen der großen basalen Tentakeln des Polypenköpfchens, befindet. Das neue Köpfchen legt sich ganz innerhalb des Perisarks an und muß infolgedessen später aus der Peridermröhre herausgeschoben werden. Dieses geschieht durch das Wachstum einer Zone, welche hinter dem Köpfchen liegt (Str_1 in Fig. 45). Was nun vom Stammstück den beiden Experimentalfällen leicht zu verstehen. Es ist natürlich klar, daß diese Verteilung der Anlageareale wieder anders geworden wäre, hätte man den Schnitt an einer dritten Stelle geführt. So hätte z. B. die Anlage der kleinen Tentakeln in den Streckstückbezirk des ersten Experimentalfalles hineinfallen können usw. Es kann

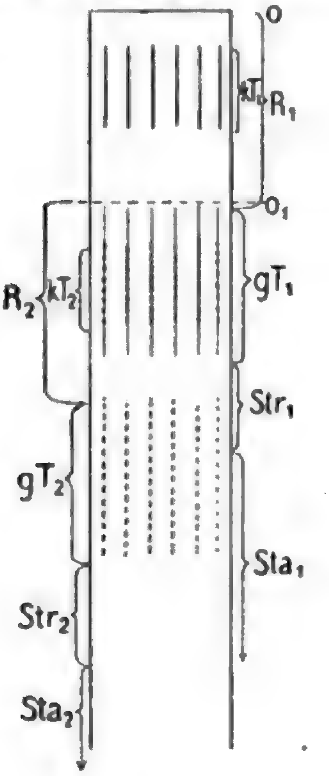


Fig. 45.

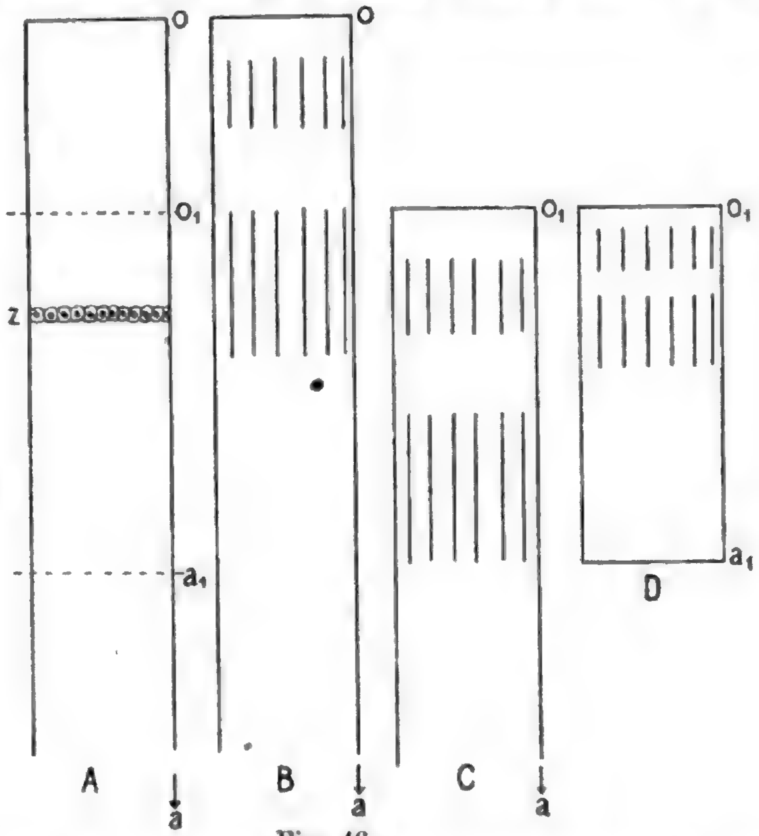


Fig. 46.

Fig. 45. Schema zur Demonstrierung der Aequipotentialität des Tubulariastammes. R Rüssel, kT kleine, gT große Tentakeln, Str Streckstück, Sta Stamm. Rechts sind die organbildenden Stammbezirke nach Schnittführung bei o, links nach Schnittführung bei o_1 eingetragen. — Fig. 46. A—D lassen das verschiedene Schicksal der Zellenreihe Z bei verschiedener Schnittführung erkennen. Der aborale Schnitt ist in A—C überhaupt nicht auf die Zeichnung gekommen. Er würde viel tiefer liegen, was die Pfeile ausdrücken sollen. Nur in D auch aborale Schnittfläche zu sehen. Schemata.

noch übrig bleibt, wird zum Stamm des neuen Polypen. Auf der rechten Seite der Figur sind alle Anlageareale für diesen ersten Experimentalfall eingezeichnet. Die Verteilung der Anlagebezirke wäre aber eine ganz andere geworden, hätten wir den Schnitt an einer anderen Stelle, z. B. bei O_1 geführt. Dann wären die kleinen Rüsseltentakeln in einem Stammbezirk angelegt worden, der im ersteren Falle sich an der Bildung der großen Tentakeln beteiligt hat. Was früher Streckstück geworden ist, hätte im zweiten Falle an der Bildung des Rüssels und der großen Tentakeln teilgenommen, zu deren Anlage auch noch Material beigetragen hätte, das beim ersten Experiment Stiel geworden ist. Durch einen Vergleich der rechten und linken Seite unserer Zeichnung ist die verschiedene Verteilung der Anlageareale in also jeder Querschnitt des Tubulariastammes alles leisten, was überhaupt in der Potenz des Systems liegt, d. h. er kann an der Bildung des Rüssels, der kleinen oder großen Tentakeln, der Wachstumszone oder des Stieles teilnehmen. Diese Aequipotentialität des Tubulariastammes ist nur in der Stielregion direkt hinter dem Polypen insofern gestört, als Stücke aus dieser Gegend zur Bildung von Abnormitäten, nämlich von Rüsseln und Doppelrüsseln neigen. Schneidet man aber dieses oralste Stück einfach fort, so hat man ein vollkommen harmonisch-äquipotentielles System vor sich.

2d) Der Clavellina-Stolo, die zentralen Teile der Schultergürtelanlage der Amphibienlarven usw.

3. Nähere Analyse des Geschehens an harmonisch-äquipotentiellen Systemen. 3a) Analyse der Dreigliederung des

Digitized by Google

Echinodermenlarvendarmes mit Hilfe von Fernkräften. Damit überhaupt Differenzierung an einem äquipotentiellen System bei Ausschluß lokalisierender äußerer Faktoren aus inneren Ursachen möglich ist, muß dasselbe trotz seiner Aequipotentialität doch Verschiedenheiten aufweisen. Eine polare Differenz würde dazu vollkommen genügen. Eine solche ist nun sicher auch am Darm der Echinodermengastrula vorhanden. Schon der Umstand, daß das eine Ende desselben frei in das Blastocöl hineinragt, das andere dagegen ins Ektoderm übergeht, muß eine Verschiedenheit an beiden Polen bedingen. Diese Verschiedenheit an den beiden Polen äquipotentieller Systeme bringt es auch mit sich, daß die Potenzen der Polbezirke Beschränkungen im Vergleich zu den anderen Bezirken des Systemes aufweisen können.

Wir wollen nun einmal hypothetischerweise annehmen, daß von den beiden differenten Enden des Darmes Fernwirkungen ausgehen, welche das Auftreten der beiden Einschnürungen am Urdarm veranlassen, durch die der Mitteldarm von den beiden anderen Darmteilen abgegliedert wird. Wie verhalten sich nun diese Fernkräfte beim experimentell verkürzten Darm? Ein Vergleich eines normalen dreigliederigen und eines aus einem verkürzten Urdarm entstandenen dreigliederigen Darmes zeigt zunächst, daß der Wirkungsbereich der Fernkräfte abgenommen hat. Derselbe ist also abhängig von der Größe des Urdarmes, von der Systemgröße. Der Vergleich zeigt aber noch ein Weiteres: Die Wirkungssphäre hat nicht beliebig abgenommen, sondern sie hat so abgenommen, daß trotz der Verkürzung eine Dreigliederung von denselben Proportionen wie beim normalen, unverkürzten Darme die Folge ist. Die Wirkungssphäre der Fernkräfte ist also nicht nur von der Systemgröße abhängig, sondern auch von dem Verhältnis der Größe der drei Darmabschnitte zueinander oder, was dasselbe ist, von dem Verhältnis der Größe des Vorder- und Enddarmes zur Größe des ganzen Systems. Diese Verhältniszahlen sind Konstanten, welche der gerade zur Beobachtung vorliegenden Echinodermenspezies eigen sind.

Die Wirkungssphäre der Fernkraft, welche am freien Ende des Urdarmes sitzt und die Abschnürung des Vorderdarmes vom Mitteldarm bewirkt, kann also so formuliert werden:

$$w = f(G, R),$$

worin G die absolute Größe des Systems und R das Verhältnis der Größe des Vorderdarmes zur Systemgröße bezeichnet.

Für die den Enddarm abgliedernde Fernkraft würde die Formel lauten:

$$w_1 = f(G, R_1),$$

wobei R_1 die Verhältniszahl der Größe des Enddarmes zur Systemgröße bedeutet.

Wir haben diese Drieschsche Analyse des Geschehens gewählt, um an der Hand des Kausalschemas die Gliederung des Echinodermenurdarmes zu analysieren. Im folgenden soll das Kausalschema beiseite gelassen und wiederum im Anschluß an Driesch eine rein funktionale Darstellung gewählt werden.

3b) **Die Analyse der Wiedererzeugung des Tubulariaköpfchens aus Stammregionen.** Bei dem Echinodermenurdarm hatten wir gesehen, daß die Wirkungssphäre der hypothetischen Fernkräfte und also damit die Lokalisation der Organbildung mit der Systemgröße wechselt. Richtet sich nun die Größe des Anlageareals eines neuen Tubulariaköpfchens an einem enthaupteten Stamm ebenfalls nach der Systemgröße? Der Versuch zeigt, daß man bei Stücken über 10 mm Länge keine Zunahme der Arealgröße mit der Systemgröße konstatieren kann. Die Arealgröße zeigt zwar individuelle Schwankungen, aber keine Abhängigkeit von der Stammgröße. Die typische Arealgröße hat Driesch als i. D. 1 mm lang erkannt, wobei unter Arealgröße der Abstand des proximalen Endes der großen Tentakelanlagen von der Schnittfläche verstanden ist, also in Figur 45 die Strecken $R_1 + gT_1$. Wie steht es nun aber mit Stammstücken unter 10 mm Länge? Es wurden zur Prüfung dieser Frage Stämme in Stücke von 8, 4, 2 und 1 mm Länge geteilt. Dabei wurde so verfahren, daß ein Stück von 1 ccm hinter dem Köpfchen abgeschnitten und überhaupt nicht benutzt wurde, weil Stücke aus dieser Gegend zur Produktion von Abnormitäten (Rüsseln und Doppelrüsseln) neigen. Zweitens wurden als kleinste Stücke die oralen und als größte die aboralen gewählt, weil letztere von Haus aus die Neigung haben, kleinere Areale zu bilden, als orale. Würde sich also bei dem Versuch die Arealgröße der Köpfchenanlage in den großen aboralen Stücken trotzdem als größer erweisen als in den oralen, so ist die Abhängigkeit der Arealgröße von der Stammlänge um so fester begründet. Das Resultat war folgendes:

Stammlänge i. D.	8 mm	4 mm	2 mm	1 mm
Arealgröße i. D.	1 mm	0,8 mm	0,56 mm	0,3 mm

Bei Stammlängen unter 8 mm hängt also die Arealgröße von der Systemgröße ab, und zwar beträgt die Reduktion bei Stücken von 4 mm Länge 20 %, bei solchen von 2 mm ca. 50 % und bei 1 mm-Stücken ca. 70 %. Es soll nun weiter unter-

sucht werden, ob die Abnahme in der Größe der Tentakelanlagen eine beliebige ist, oder ob sich die Größen des Areals der kleinen und großen Tentakeln proportional verändern, so daß also die kleineren Köpfchen typische Verkleinerungen von normalen Proportionen eines gewöhnlichen Tubulariaköpfchens sind?

Die Messungen ergaben:

Stammlänge i. D.:	8 mm	4 mm	2 mm	1 mm
Verhältnis der Länge des Areals der kleinen Tentakeln zu der des Areals des großen:	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2{,}38}$

Die normalen Proportionen bleiben also ganz strikte bei Stammlängen von 8 bis 2 mm gewahrt. Die Abweichungen bei den kleinsten Stücken erklären sich daraus, daß bei ihnen exakte Messungen überhaupt besonders schwierig sind, und daß in diesen Fällen auch die Entstehungsart des kleinen oralen Tentakelkranzes eine etwas andere als bei größeren Stücken ist. Das Fazit ist demnach dieses: Die Länge der beiden Reihen von Längswülsten, welche die Anlagen der beiden Tentakelkränze repräsentieren, ist bei Stücken unter 8 mm Länge von der Systemgröße und der Verhältniszahl der Länge des kleinen zu der des großen Tentakelkranzes abhängig.

Also

$$l = f(G, R),$$

wobei l die Länge der beiden Tentakelanlagen, G die Größe des Systems und R das Verhältnis der Längen der beiden Tentakelkränze zueinander bedeuten. Man sieht, es ist dieselbe Formel, welche wir oben bei der Gliederung des Echinidendarmes kennen gelernt hatten. Nur haben wir hier die Ausdehnung der Anlageareale und dort die Wirkungssphäre der hypothetischen Fernkräfte, von denen die Begrenzung der Anlageareale abhing, ins Auge gefaßt, was auf dasselbe hinauskommt.

3c) Eine andere Formulierung des Geschehens bei der Erzeugung eines neuen Tubulariaköpfchens aus Stammmaterial. Wir fassen in einem Stammstück oa (Fig. 46 A) eine bestimmte Zellenreihe Z ins Auge und fragen nach dem Schicksal derselben, d. h. danach, in welchen Teil des Köpfchens die betreffenden Zellen zu liegen kommen. Wie Figur 46 B zeigt, würden sie sich an der Bildung der großen basalen Tentakeln beteiligen. Würden wir aber von dem oralen Ende des Stammstückes etwas abschneiden, so daß der Abstand der Zellenreihe von der oralen Schnittfläche kleiner wäre, so würde die Zellenreihe in die kleinen Tentakeln zu liegen kommen, wie Figur 46 C erkennen läßt. Das Schicksal der Zellenreihe ist also erstens abhängig von ihrem Abstand von der oralen Schnittfläche, S=f(a). Das genügt aber noch nicht, denn bei Stammstücken unter 8 mm besteht eine Abhängigkeit der Größe der Anlageareale von der Systemgröße, wie Figur 46 D zeigt, in der die Zellenreihe denselben Abstand von O_1 wie in Figur 46 C hat, wo sie aber trotzdem nicht in den kleinen, sondern den großen Tentakelkranz zu liegen gekommen ist. Das Schicksal der Zellenreihe ist demnach auch abhängig von der Systemgröße, S=f(a, g). Aber auch diese Formel ist noch unvollständig, denn es fehlt in ihr noch die Hauptsache: das Schicksal der Zellenreihe ist nämlich noch abhängig von der Fähigkeit des Stammstückes, alle Teile des Tubulariaköpfchens in ganz bestimmten Größenverhältnissen und in ganz bestimmten Lagen zueinander zu bilden. Nennen wir diesen dritten, konstanten Faktor E, so haben wii die Formel

$$S = f(a, g, E),$$

worin S das Schicksal, a den Abstand von der oralen Schnittfläche, g die Größe des Systems und E die Größen- und Lagebeziehung der einzelnen Teile des Polypenköpfchens zueinander, oder kurz die spezifische Form des Tubulariaköpfchens bedeuten. Das Ziel, welches erreicht werden soll, spielt also bei der Schicksalsbestimmung der Zellenreihe eine Rolle. Deshalb wurde der letzte Faktor, von dem das Schicksal abhing, von Driesch mit dem Buchstaben E bezeichnet, mit dem Anfangsbuchstaben des aristotelischen Begriffes: Entelechie.

4. Driesch's erster Beweis der Autonomie der Lebensvorgänge. Driesch's Gedankengang ist folgender: Die Lebewesen resp. ihre Keime könnten, falls ihre Entwickelung durchaus physikalisch-chemisch verständlich wäre, nur komplizierte dreidimensionale Maschinen repräsentieren, d. h. typisch geordnete Kombinationen einzelner physikalischer und chemischer Bestandteile, die, in Gang gesetzt, typische Effekte zur Folge haben. Sind nun aber dreidimensionale Maschinen denkbar, die äquipotentielle Systeme sind, für deren Teile also auch die Formeln gelten, welche wir eben aufgestellt haben? Die Antwort lautet: Nein, denn nimmt man einer Maschine einen Teil, so vermag sich der Rest nicht zu einer neuen kleinen Maschine umzuordnen; bei ihr kann der entnommene Teil höchstens wieder von außen durch einen neuen ersetzt werden. Da es aber unter den organischen Formen harmonisch-äquipotentielle Systeme gibt, unter den anorganischen dagegen nicht, so folgt daraus, daß das Geschehen an Lebewesen nicht restlos physikalisch-chemisch erklärt werden

Digitized by Google

kann. Somit wäre also die Autonomie der Lebensvorgänge begründet.

5. Driesch's zweiter Beweis der Autonomie der Lebensvorgänge aus der Existenz von äquipotentiellen Systemen mit komplexen Potenzen. Es liegt auf der Hand, daß alle Elemente des Eierstockes der Potenz nach gleich sind, da jedes Ei einen vollständigen Organismus aus sich hervorgehen lassen kann. Wodurch unterscheidet sich nun aber das äquipotentielle System des Eierstockes von dem des Echinodermenurdarmes? Bei letzterem konnte sich jeder organbildende Entodermbezirk an jeder einzelnen Leistung beteiligen, die überhaupt in der Potenz des Systems lag, bei ersterem kann dagegen jedes Element das Ganze bilden. Während sich jeder Bezirk des harmonisch-äquipotentiellen Systems des Echinodermenurdarmes entweder an der Bildung der Cölomsäcke oder des Vorder- oder des Mittel- oder des Enddarmes, also an einem singulären Geschehen beteiligen kann, läßt jedes Element des Eierstockes nicht einen Teil eines Ganzen, sondern das Ganze aus sich hervorgehen, liefert also ein komplexes Geschehen. Deshalb hat Driesch die Ovarien im Gegensatz zu den harmonisch-äquipotentiellen Systemen als äquipotentielle Systeme mit komplexen Potenzen bezeichnet. Um aus der Existenz äquipotentieller Systeme mit komplexen Potenzen die Autonomie der Lebensvorgänge zu beweisen, stellt Driesch folgendes Raisonnement an: Die Entwickelung eines Organismus aus dem Ei könnte nur dann ohne Rest physikalisch-chemisch erklärt werden, wenn eine komplizierte dreidimensionale Maschine im Ei vorhanden wäre, die den Organismus fabrizierte. Da nun aber alle Elemente des Eierstockes durch Teilung aus einer Urgeschlechtszelle hervorgehen, so kann in den Eiern keine komplizierte dreidimensionale Maschinerie vorhanden sein, denn eine solche kann sich nicht unzählige Male teilen und dabei ganz bleiben.

6. Die Kritik des Drieschschen Standpunktes. 6a) Allgemeine. Einwände gegen Drieschs Auffassung von der Autonomie der Lebensvorgänge sind von verschiedenen Forschern erhoben worden, vor allem von Bütschli und Roux, obwohl der letztere selbst schon vor langer Zeit die Selbstregulation der Lebewesen als charakteristisches Merkmal der Organismen dem Anorganischen gegenüber erkannte und vorsichtig auf alle Vorgänge hinweist, die „zurzeit für uns in der Art ihres Geschehens, in ihren Faktoren und deren Wirken gar nicht vorstellbar“ sind. Roux verwirft deshalb das Einführen der Entelechie als eines elementaren Naturfaktors, weil dieselbe kein einfaches, sondern ein „Agens von unübersehbarer Mannigfaltigkeit“ sei. Um aber die Ansicht von der Autonomie der Lebensvorgänge wirklich zu widerlegen, müssen

6b) Einwände gegen die Beweise Driesch's erhoben werden. Dies ist von Bütschli, Rhumbler, Przibram, Gustav Wolff und zur Strassen geschehen. Es ist natürlich ganz unmöglich, das Für und Wider aller dieser Einwände hier zu erörtern, es sei deshalb nur erwähnt, daß Driesch auf alle geantwortet hat und seine Ansicht trotz derselben nach wie vor aufrecht erhält. Nur einen Einwand wollen wir etwas näher besprechen, da diese Besprechung uns zugleich über den Unterschied zwischen Organismen und Kristallen aufklären wird.

6c) Die Kristalle als angeblich harmonisch-äquipotentielle Systeme. Przibram hat an verletzten Kalialaunkristallen gezeigt, daß sich dieselben nicht nur in übersättigten, sondern auch in gesättigten, vor Verdunstung geschützten Lösungen regenerieren können, ohne daß eine Massenzunahme des verletzten Kristalls dabei erfolgt. Die verletzten Kristalle wurden bei „fast genau konstanter Temperatur von 12° C“ gehalten. Die Restitution vollzog sich bei dieser Versuchsanordnung in der Weise, daß sich Teilchen von den unverletzten Partien des Kristalles (vielleicht wegen geringfügiger Steigerung der Temperatur) ablösten und an den verletzten Stellen (wahrscheinlich bei wiedereintretendem Sinken der Temperatur) wieder ablagerten. Es kann also ein Alaunteilchen, das ursprünglich eine Fläche bilden half, im Experimentalfalle an eine ganz andere Stelle des Kristalles zu liegen kommen. Noch größere Aehnlichkeit mit der Bildung eines kleinen dreigliederigen Darmes aus einem verkürzten Echinodermenurdarm ohne Wachstum hat die Regeneration der quellbaren Hämoglobinkristalle. Dieselben wurden unter dem Deckgläschen zerdrückt, und die Bruchstücke dann durch Wassereinwirkung zu kleinen, rundlichen Stückchen eingeschmolzen. Wird darauf wieder Hämoglobinlösung zugesetzt, so lagern sich neue Teilchen um den Kern ab, der sich immer an seiner dunkleren Farbe von den neu angesetzten Regionen unterscheiden läßt. Das wichtigste ist nun aber, daß der alte, ursprünglich runde Kern nach der Regeneration durch Umlagerung seiner Teile wieder rhombische Form annimmt. In diesem Falle hängt nun nach Przibrams Auffassung die endliche Lage eines Teilchens in dem sich zu einer rhombischen Form umformenden Kern auch ab von seiner Entfernung von der Wundfläche, von der Größe des Bruchstückes und von der Form, in welcher Hämoglobin kristallisiert, so daß demnach die von

Digitized by Google

Driesch für das Schicksal eines Teilchens eines harmonisch-äquipotentiellen Systemes aufgestellte Formel: S=f (a, g, E) auch hier an diesem anorganischen Objekte gelte. Es ist hierauf jedoch zu erwidern, daß die Formel hier deshalb nicht angewendet werden kann, weil man gar nicht von einem anderen Schicksal der Kristallteilchen im normalen und im Experimentalfalle, sondern nur von einer anderen Lage derselben reden kann, denn die Teilchen bleiben dieselben, auch wenn sie bei der Regeneration verlagert werden, sie besitzen keine Entwickelungspotenz im Sinne der Zellen eines tierischen Keimes. Bei den Kristallen handelt es sich eben nur um die typische Anordnung homogener, bei den Organismen dagegen um die typische Anordnung heterogener Teile, kurz es sind die Kristalle nicht differenziert, aber die Lebewesen sind es.

6d) „Das Ganze" als Faktor. In den Formeln, welche Driesch durch Analyse des Geschehens an harmonisch-äquipotentiellen Systemen gewonnen hat, spielt „das Ganze" die hervorragendste Rolle und zwar sowohl in quantitativer wie in qualitativer Beziehung: war doch das Schicksal einer Zellenreihe einmal abhängig von der Größe des Systems und dann aber auch von den Relationszahlen, welche die Lage- und Größebeziehungen der einzelnen Organanlagen zueinander und zum Ganzen ausdrückten. Es gibt nun Forscher, welche wie Rignano, Eugen Schultz und Child den Einfluß des Ganzen während der Entwickelung rückhaltlos zugestehen, ohne damit aber zugleich die Richtigkeit des Vitalismus anzuerkennen. Rignano und Child wenigstens betonen letzteres ausdrücklich. Hiernach wäre also bei den Drieschschen Ansichten zwischen der Richtigkeit des Ganzen als Entwickelungsfaktor und der Richtigkeit der Autonomie der Lebensvorgänge zu unterscheiden. Daß die Leistungen der einzelnen Partien eines harmonisch- äquipotentiellen Systems alle „mit Rücksicht auf das Ganze" erfolgen, ist eine Tatsache; es fragt sich nur, was das „mit Rücksicht auf das Ganze" bedeutet? Die Worte sind nämlich zunächst weiter nichts als ein Bild, das unserem Vergleich der Entwickelung aus dem Ei mit der Uhrenfabrikation in einer Uhrmacherkolonie entnommen ist, in der die einzelnen Arbeiter zwar eine ganze Uhr resp. einen jeden ihrer Teile anfertigen können, aber doch nur immer einen bestimmten macher. Es wäre natürlich vollkommen verkehrt, zu sagen, die Leistungen der einzelnen Arbeiter erfolgten nicht mit Rücksicht auf das Ganze, wenn es gelingt, die Gemeinsamkeit derselben auf irgendeine Weise zu zersprengen, oder den einzelnen Individuen der Ganzheit falsche Nachrichten zukommen zu lassen, so daß etwa alle dieselbe Leistung vollführen. Deshalb ist es aber auch verkehrt, gegen die Annahme des Ganzen als Faktor Experimentalresultate anzuführen, die weiter nichts beweisen, als daß man das Ganze zertrümmern und dadurch seinen Einfluß auflösen oder die einzelnen Teile des Ganzen zu falschen Leistungen bringen kann.

6e) Die Entelechie als Grenzbestimmung. Wenn schließlich der Verfasser dieses Artikels noch seine eigene Meinung aussprechen darf, so sei kurz bemerkt, daß er bis jetzt die Entelechie nicht als Naturfaktor ansieht, der uns positive Einsicht in die Entstehungsursachen der Organismen gewährt, sondern als einen Begriff, der alles das zusammenfaßt, was an den organischen Formen zu entschleiern der exakten Naturwissenschaft überhaupt verschlossen ist. Die Aufstellung des Begriffes Entelechie bedeutet also für ihn das Ziehen einer Grenze für seine eigenen Bestrebungen, kurz eine negative, aber doch immerhin eine Einsicht. Es liegt im Begriffe der Grenze, daß immer die Neigung zu ihrer Ueberschreitung vorhanden sein wird. So mag man künftighin, vielleicht auch einmal jahrzehntelang, meinen, man habe die Grenzen beseitigt, es wird schließlich doch wieder ein vorsichtiger Denker auftauchen und zeigen, daß sie immer noch da sind. Aber selbst dann, wenn Entelechie mehr ist als eine Grenzbestimmung, würde die Naturforschung doch nur feststellen können, von was für Bedingungen ihr Inerscheinungtreten abhängig ist. Diese Bedingungen können aber nur physikalische und chemische Konstellationen sein, was übrigens Driesch selbst zugibt.

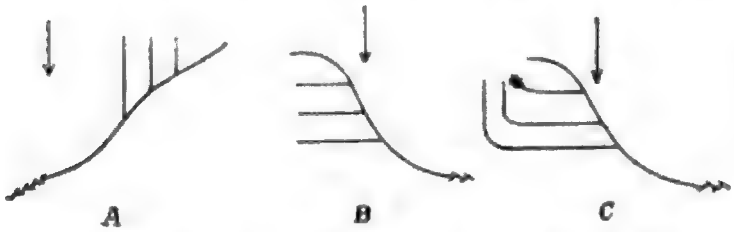
IV. Die äußeren Faktoren der tierischen Entwickelung.

Man kann die äußeren Faktoren, welche die Entwickelung der Organismen beeinflussen, ihrer kausalen Wertigkeit nach in drei verschiedene Gruppen einteilen: A. in notwendige äußere Faktoren. Dieselben sind, wie ihr Namen sagt, zum normalen Ablauf der Ontogenese, und z. T. auch zur normalen Lebenserhaltung unbedingt notwendig. An diese notwendigen äußeren Faktoren kann man B. die anregenden äußeren Faktoren anschließen, deren Anwesenheit zu einer Formbildung nicht unbedingt notwendig ist, die aber trotzdem fördernd auf dieselbe einwirken können. An dritter Stelle wären dann schließlich noch C. die abändernden äußeren Faktoren zu besprechen, welche abändernd auf den typischen Verlauf der Entwickelung einwirken, ohne daß dadurch unbedingt existenzunfähige Mißbildungen zu entstehen brauchen. Wir beginnen unsere Darstellung mit der ersten Kategorie der äußeren Faktoren.

Digitized by Google

A. Die notwendigen äußeren Faktoren.

1. Der Einfluß der Schwerkraft. 1a) Einfluß der Schwerkraft auf die Wachstumsrichtung der Hydroidpolypen. Geotropismus. Die Hydroidpolypenstöcke sind bekanntlich an ihrer Basis mit wurzelartigen Ausläufern an einer Unterlage befestigt, während ihre polypentragenden Stämme frei ins umgebende Medium hinausragen. Es hat sich nun herausgestellt, daß die Wachstumsrichtung der Stämme und Stolonen im hohen Maße von äußeren Faktoren abhängig ist. Bei der Neapler Form von Sertularella polyzonias ist es nach Driesch die Schwerkraft, welche richtend auf das Wachstum einwirkt. Dieser Hydroidpolyp produzierte im Aquarium aus unbekannten Gründen an Stelle von Polypen Stolonen, von denen der Hauptstolo, wie die Figuren 47 A—C zeigen, in seiner Wachstumsrichtung nicht durch die Schwerkraft beeinflußt wird, während die Tochterstolonen stets an der nach oben gekehrten Seite des Primärstolo entstehen und senkrecht nach oben wachsen (Fig. 47 A). Legt man nun das

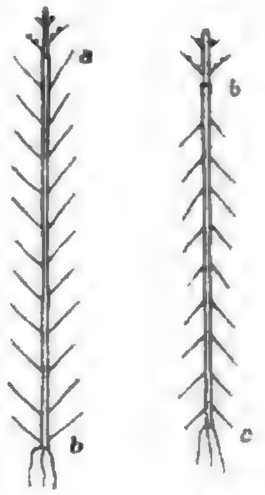


A B C

Fig. 47 A bis C. Geotropismus der Neapler Sertularella-Art. Die Pfeile bezeichnen die Schwerkraftsrichtung. Der Stern in C bedeutet ein Polypenköpfchen. In b und c sind die Stöcke künstlich umgelegt. Nach Driesch.

Stammstück mit den neuentstandenen Stolonen so um, daß die anfänglich senkrecht stehenden Tochterstolonen wagerecht zu liegen kommen (Fig. 47 B), so sieht man nach einiger Zeit, daß sie ihre ursprüngliche Wachstumsrichtung senkrecht nach oben wieder eingeschlagen haben (Fig. 47 C). Es liegt hier eine Erscheinung vor, welche von den Botanikern als negativer Geotropismus bezeichnet wird.

1b) Einfluß der Schwerkraft auf den Ort und die Qualität der Organbildung. Barymorphosen und der Begriff der Heteromorphose nach Loeb. Die Schwerkraft kann nun aber nicht nur die Wachstumsrichtung von Organen, sondern auch den Entstehungsort derselben bestimmen, sie kann auch, wie sich Herbst ausdrückt, als formativer Reiz wirken und Barymorphosen hervorbringen. Als Beispiel können wir da auf den eben geschilderten Fall der Neapler Sertularellaform hinweisen, bei welcher die an Stelle von Polypen entstandenen Stolonen zweiter Ordnung stets an der nach oben gewandten Seite des Primärstolos gebildet wurden. Hier beeinflußte also die Schwerkraft nicht nur die Wachstumsrichtung der Organe, sondern lokalisierte zugleich auch die Entstehung derselben. Das klassische Beispiel für eine derartige Beeinflussung der Gestaltung durch die Schwerkraft liefert aber Antennularia antennina. Loeb stellte an herausgeschnittenen Stammstücken dieses Hydroidpolypen fest, daß die neuen Stolonen stets an dem nach unten gerichteten, die neuen Sprosse mit Polypen an dem nach oben gerichteten Ende entstehen, gleichgültig, ob die basale (b) oder die apikale Schnittfläche (a) nach unten gerichtet ist (Fig. 48 A und B). Da im letzteren Falle an der nach unten gerichteten Spitze, wo eigentlich neue Polypensprosse hätten entstehen sollen, Stolonen hervorwachsen, so spricht Loeb von einer Heteromorphose. Dieser Begriff ist also in diesem Falle gleichbedeutend mit Umkehrung der Polarität, er wird jedoch auch in Fällen angewandt, wo eine Umkehrung der Polarität gar nicht in Frage kommt. Miß Stevens hat am Klinostaten untersucht, ob die Schwerkraft bei Antennularia antennina nur lokalisierend wirkt oder ob sie ein zur Organbildung überhaupt notwendiger Faktor ist, und ist dabei betreffs der Entstehung neuer Stämme und Stolonen zu verschiedenen Resultaten gelangt. Wurden nämlich die herausgeschnittenen Stücke des Stockes an einem Rade von 7 cm Radius, das in 20 Minuten 1 Umdrehung machte, befestigt, so wurden neue Stämme in verschiedener Richtung unabhängig von der Schwerkraft regeneriert. Es scheint also, daß die Schwerkraft bei der Erzeugung neuer Stämme nur den Ort ihrer Entstehung bestimmt, während sie bei der Entstehung der Stolonen zugleich organbildungauslösend zu wirken scheint, denn es wurden an dem Rad so



A B

Fig. 48 A und B. Barymorphose bei Antennularia antennina. In A basales Ende (b) nach unten, in B nach oben gekehrt. Nach Loeb.

Digitized by Google

gut wie keine Stolonen von den Stammstücken hervorgebracht. Es ist angesichts der bei **Antennularia antennina** ermittelten Tatsachen angebracht, zu betonen, daß Befunde, welche an einer Species gemacht wurden, nicht auch ohne weiteres auf andere übertragen werden dürfen. Die Entstehungsorte neuer Stämme und Stolonen sind nämlich bei **Antennularia ramosa** unabhängig von der Schwerkraft, obgleich die Stämme bei ihrem Weiterwachsen negativen Geotropismus zeigen.

1c) Pflügers Ansicht, daß bei der Entwickelung des Froscheies „die Schwerkraft die Organanlage beherrscht", hat sich durch die Untersuchungen von **Born** und **Roux**, die auch von **Kathariner** und **Morgan** bestätigt wurden, als irrtümlich herausgestellt, denn Ausschluß der Schwerkraftswirkung hat normale Entwickelung und nicht etwa regellose Anordnung der Organanlagen zur Folge. Die Schwerkraft vermag beim Froschei weiter nichts, als bei schiefer Zwangslage des Eies die verschieden schweren Eisubstanzen nach ihrem spezifischen Gewicht wieder regelrecht zu ordnen. Das ist aber kein Vorgang, der mit der Lokalisierung der Organbildung bei Hydroidpolypen durch die Schwerkraft auf gleiche Stufe zu stellen ist, selbst wenn man mit **Loeb** annimmt, es seien zur Hervorbringung neuer Stämme spezifisch leichtere und zur Erzeugung von Stolonen spezifisch schwerere Substanzen notwendig, die sich an der oberen resp. unteren Schnittfläche ansammeln. Bei dem schief gestellten Froschei wird nämlich der gesamte Eiinhalt durch die Schwerkraft umgelagert und wieder in normale Lage gebracht. Nachdem diese wiedererlangt ist, ist die Wirkung der Schwerkraft vorbei. Bei dem Hydroidpolypenstammstück, das mit dem apikalen Ende nach unten aufgestellt worden ist, wird jedoch nicht das gesamte Cönosark umgelagert. Dasselbe behält vielmehr seine Lage vollkommen bei, und es sind höchstens Stoffe innerhalb des Cönosarks, welche nach ihrem spezifischen Gewicht sich entweder unten oder oben ansammeln. Ist diese hypothetische Umordnung der „organbildenden Stoffe" bei dem Hydroidpolypenstammstück geschehen, so wirken diese dann auf die Zellen an den Schnittflächen derartig ein, daß jetzt an der nach unten gekehrten Spitze Stolonen und an der nach oben gewendeten Basis ein neuer Stamm mit Polypen hervorwachsen. Mit anderen Worten kann man den Unterschied zwischen der Wirkung der Schwerkraft auf ein schief gestelltes Froschei und auf ein invertiertes Stammstück eines Hydroidpolypen auch so formulieren: Bei dem schief gestellten Froschei wird das Baumaterial durch die Schwerkraft geordnet, bei dem Hydroidpolypen dagegen werden jene Faktoren lokalisiert, welche die Verwendung des Baumaterials in bestimmter Weise vorschreiben.

2. Der Einfluß des Kontaktes. 2a) Der Einfluß des Kontaktes auf die Wachstumsrichtung der Hydroidpolypen. Thigmo- oder Stereotropismus. Derselbe läßt sich z. B. sehr schön an **Tubularia** feststellen, deren Köpfchen, wenn sie mit einem festen Körper in Berührung kommen, von diesem fortwachsen (negativer Thigmotropismus), während ihre Stolonen an dem Körper, den sie berühren, entlang wachsen. Auch bei **Pennaria** zeigen die wachsenden Polypen negativen Thigmotropismus.

2b) Der Einfluß des Kontaktes auf den Ort und die Qualität der Organbildung ist von **J. Loeb** bei den Hydroidpolypen **Margelis** und **Pennaria** konstatiert worden. Da, wo der Polypenstock einen festen Körper berührt, wachsen Stolonen hervor, während da, wo er frei ins Wasser ragt, Polypen gebildet werden, gleichgültig, ob das basale oder das apikale Ende berührt wird. Bei **Pennaria** gelang es **Loeb** wiederholt, an beiden Enden Stolonen zu erzeugen, wenn beide mit einem soliden Körper in Berührung waren. Man kann diese morphologische Wirkung der Berührung als Thigmomorphose bezeichnen.

3. Der Einfluß des Lichtes. 3a) Der Einfluß des Lichtes auf die Wachstumsrichtung der Hydroidpolypen. Helio- oder Phototropismus. Die ersten Beobachtungen von heliotropischen Wachstumskrümmungen bei Tieren rühren von **Driesch** her, der sie an einer nordischen Form von **Sertularella polyzonias** konstatierte, welche ebenso wie die Neapler Form an Stelle von Polypen Stolonen produzierte. Die Stolonen erster Ordnung sind, wie Figur 49 zeigt, negativ heliotropisch, die zweiter, dritter und vierter Ordnung sind zu Anfang positiv heliotropisch, werden aber, nachdem sie 1 oder 2 Tochterstolonen abgegeben haben, negativ heliotropisch, wie die Stolonen erster Ordnung. Sehr energischen positiven Heliotropismus entdeckte **J. Loeb** an den polypentragenden Stämmen von **Eudendrium racemosum**.

3b) Das Licht als lokalisierender Faktor bei Organbildungen. Das einzige Beispiel hierfür liefert die nordische Form von **Sertularella polyzonias**, bei welcher der Entstehungsort der Stolonen zweiter und höherer Ordnung durch die Lage zur Lichtquelle bestimmt wird. Sie entstehen an der Lichtseite.

Digitized by Google

3c) Das Licht als notwendige Entwickelungsbedingung. α) Der Einfluß des Lichtes auf die Polypenbildung von Eudendrium. J. Loeb stellte an Stammstücken von Eudendrium fest, daß dieselben zur Produktion von Polypen des Lichtes bedürfen, während Stolonen auch in de Dunkelheit entstehen. Er machte auch Versuche mit verschiedenfarbigem Licht und fand dabei, daß die stärker brechbaren Strahlen die Polypenbildung begünstigten, während die weniger brechbaren (roten) wie Dunkelheit wirkten. Miß Peebles konnte das Hauptresultat von Loeb im großen und ganzen bestätigen. In der Dunkelheit bildeten 90 % der Stammstücke an den Schnittenden Stolonen und nur 10 % Polypen, während im Hellen an Stelle der Stolonen bei der Majorität Hydranten entstanden. Wahrscheinlich ist zur Polypenbildung ein Stoff notwendig, der nur im Lichte gebildet werden kann. Ist von diesem Stoff in dem Stammstück eine genügende Menge vorhanden, bevor es ins Dunkle gebracht wird, dann können auch Polypen im Dunklen entstehen. Da nach Loeb im Hellen auch an der Schattenseite Polypen gebildet werden, wenn auch weniger als an der Lichtseite, haben wir das Licht als notwendige Entwickelungsbedingung für die Eudendriumhydranten und nicht wie bei Sertularella als lokalisierenden Faktor bezeichnet.

Fig. 49. Heliotropismus der an Stelle von Personen entstandenen Stolonen von Sertularella polyzonias. Der Pfeil gibt den Einfall der Lichtstrahlen an. Nach Driesch.

β) Der Einfluß verschiedenfarbigen Lichtes auf Entwickelung und Wachstum der Tiere ist von Driesch an Rana esculenta, Planorbis und Seeigeln mit dem Resultat geprüft worden, daß auf die Stadien der Organanlage weder Licht noch Dunkelheit, noch verschiedenfarbiges Licht irgendeinen Einfluß haben. Für das spätere Wachstum der Embryonen schien dagegen nach Untersuchungen von Yung blaues und violettes Licht am günstigsten zu wirken, doch sind diese letzteren Angaben neuerdings bestritten worden. Sonderbar ist, daß von verschiedenen Forschern eine Schädlichkeit des grünen Lichtes angegeben wird.

γ) Der Einfluß des Lichtes auf die Ausbildung der Augen des Grottenolms. Neuerdings ist es Kammerer gelungen, die normalerweise rudimentär bleibenden Augen von Proteus in einigen Fällen zur vollständigen Ausbildung mit Cornea, wohlentwickelter Linse, Glaskörper, Stäbchen und Zapfen zu bringen. Er hielt die Tiere möglichst von der Geburt an 5 Jahre lang in Tageslicht, das periodisch mit roter Beleuchtung wechselte, um die Pigmentation der Haut, welche die darunter liegende Augenanlage vor dem Lichte schützen würde, nicht zu stark werden zu lassen, denn Rot begünstigt nicht die Pigmentbildung.

δ) Den Einfluß des Lichtes auf die Pigmentbildung hat List im Anschluß an negativ ausgefallene Experimente Faussek's an Lithodomus und Mytilus durch langandauernde Versuche geprüft. Er kam dabei zu dem Resultate, daß eine verstärkte Belichtung eine stärkere Pigmentablagerung und Lichtmangel eine Abnahme des Pigmentes zur Folge hat. Nach Untersuchungen von Kapterew wird das Auge der Daphniden im Dunklen depigmentiert, und daß der Grottenolm im Tageslicht Pigment erhält, ist eine bekannte Erscheinung. Sehr interessant sind auch die Experimente von Cunningham, dem es gelang, durch Beleuchtung von unten eine Pigmentierung der Bauchseite von Pleuronectiden herbeizuführen, während bekanntlich normalerweise die Dorsalseite pigmentiert ist. Trotzdem ist aber die kausale Beziehung zwischen Licht und Pigmentbildung nicht durchweg derartig einfach, wie diese Beispiele anzudeuten scheinen. Das zeigen u. a. die Untersuchungen von Fischel an Salamanderlarven, bei denen eine dunkle Pigmentierung durch niedere und eine helle durch höhere Temperatur erzielt werden kann, während Belichtung und Verdunkelung von untergeordneter Bedeutung für die Pigmentierung dieser Tiere sind. Doch hat nach den Experimenten von Kammerer die Farbe des Untergrundes einen ausgesprochenen Einfluß auf die Färbung von Salamandra maculosa, wie wir bald noch näher sehen werden.

ε) Der Einfluß der Farbe der Umgebung auf die Färbung der Tiere. ε_1) Der Einfluß der Farbe der Umgebung auf die Farben der Schmetterlingspuppen. T. W. Wood ist wohl der erste gewesen, welcher die Abhängigkeit der Färbung gewisser Schmetterlingspuppen von der Farbe der Umgebung einer experimentellen Prüfung unterzog und dabei feststellte, daß die Färbung der Puppen des kleinen Kohlweißlings (Pieris rapae) mit der Farbe der Umgebung wechselt, in welcher die Raupen aufgewachsen waren. In Kästen mit dunklen Wänden wurden die Puppen sehr dunkel, in weißen Kästen dagegen fast weiß. In Ueberein-

Digitized by Google

stimmung damit fand er im Freien an einer weißen Mauer nahezu weiße, an einer roten rötliche und an einem geteerten Pfahl fast schwarze Puppen vor. Sehr interessant sind auch die Angaben eines anderen englischen Entomologen, Barber, der die Raupen eines südafrikanischen Schmetterlinges (Papilio nireus) in einem Behälter hielt, dessen eine Seite aus einer roten Ziegelmauer, dessen andere aus gelblichem Holze bestanden. Die Puppen nahmen auch hier die Farbe der Unterlage an, auf der sich die Raupen festgeheftet hatten. An Orangeblättern wurden sie dunkelgrün, an Banksiablättern verblichengrün und am gelblichen Holze gelblich. Die ausgedehntesten Versuche rühren aber von Poulton her, welcher z. B. die Raupen des Kohlweißlings vor der Verpuppung in Kästen brachte, welche mit schwarzem, rotem, gelbem oder grünem Papier ausgeschlagen waren. Die Farbenskala der aus solchen Raupen gezogenen Puppen ist geradezu verblüffend, auch wenn man nicht sagen kann, daß die Farbe der Umgebung genau von den Puppen kopiert wird, sondern nur annähernd. Auch aus den Raupen von Vanessa urticae konnte er je nach der Farbe der Umgebung recht verschieden gefärbte Puppen züchten, obschon die Farbenskala hier nicht derartig groß war, wie er sie bei Pieris rapae erhalten hatte. An alle Farben ist übrigens eine Farbenanpassung der Schmetterlingspuppen nicht möglich.

ε_2) Der Einfluß der Farbe des Untergrundes auf die Färbung der Bartgrundel, Nemachilus barbatula L. In den Artikel Entwickelungsmechanik gehören natürlich nur solche Beispiele von Farbenanpassungen, wo die Uebereinstimmung der Färbung des Tieres mit der Farbe der Umgebung nicht durch Chromatophorenbewegungen herbeigeführt wird, sondern wo dieselbe eine Folge der veränderten Pigmentbildung ist. Letzteres kommt nach den Untersuchungen von Šećerov bei den Farbveränderungen der Bartgrundel auf verschiedenfarbigem Untergrund, wenn auch nicht ausschließlich, so doch zum mindesten mit in Betracht. Šećerov hielt seine Versuchstiere 7 Monate hindurch auf hellem und dunklem und auf verschiedenfarbigem Untergrunde, welcher aus Glassand, aus Hornblendegranit, aus Kies von gemischter, vorwiegend roter Farbe oder auch einfach aus untergelegtem, glänzendweißen, mattschwarzen oder orangefarbigen Papier bestand. Die Farbenanpassungen, welche er auf diese Weise erhielt, sind in der Tat überraschend. Auf hellem Grund erfahren die Tiere eine Aufhellung und auf dunklem eine Verdunkelung, und die Farben der verschiedenen Untergründe werden ebenfalls annähernd nachgemacht. Werden verschieden gefärbte Tiere dem Einflusse des gleichen Untergrundes ausgesetzt, so zeigen dieselben eine Konvergenz in ihrer Farbveränderung nach der Farbe des Untergrundes hin. Šećerov hat, abgesehen von verschiedenfarbigem reflektiertem Licht auch monochromatisches einfallendes Licht von roter, oranger, grüner, blauer und violetter Farbe zu seinen Experimenten benutzt und auch damit erzielt, daß die Fische „bis zu einem gewissen Grade einen farbigen Ton der betreffenden Farbe“ annahmen. Tiere, die im Dunklen gehalten wurden, wurden dunkelrotbraun, und diese Farbe bekamen auch total geblendete Tiere, die sich im Hellen befanden. Solche dunkelrotbraune blinde Tiere haben die Fähigkeit, auf hellem Untergrunde sich aufzuhellen, vollkommen verloren, sie bleiben andauernd dunkel und bekommen im Hellen sogar eine pigmentierte Bauchseite.

ε_3) Farbenanpassung und natürliche Farbenphotographie. Für das Zustandekommen der Farbenanpassung gibt es dreierlei Erklärungsmöglichkeiten, von denen zwei schon vor langer Zeit im Anschluß an die Experimente mit Schmetterlingspuppen erörtert worden sind. Die nächstliegende dieser drei Möglichkeiten ist natürlich die, daß man die Farbenanpassungen, welche sich experimentell beherrschen lassen, mit natürlicher Farbenphotographie, also die Haut der betreffenden Tiere mit einer farbenempfindlichen photographischen Platte vergleicht. Dem steht die zweite Erklärungsmöglichkeit gegenüber, welche in der Farbenanpassung einen komplizierten, durch Photorezeptionsorgane und Nervensystem vermittelten Prozeß sieht; und schließlich wäre noch eine Kombination der beiden ersten Hypothesen zu einer dritten möglich, wenn man annimmt, daß die Farbenanpassung in letzter Instanz zwar ein farbenphotographischer Prozeß sei, daß aber der Ablauf dieses Prozesses von Impulsen abhängig sei, die den Hautbezirken durch das Nervensystem zugeleitet werden und auf Photorezeptionen zurückzuführen sind. Was nun zunächst die erste der drei Erklärungsmöglichkeiten anbetrifft, so hat Wiener darauf hingewiesen, daß die Experimente Poultons uns nicht dazu berechtigen, die Farbenanpassungen der Schmetterlingspuppen als Farbenphotographie zu bezeichnen, und zwar deswegen nicht, weil die zukünftige Farbe einer Haut zu einer Zeit beeinflußt werden kann, wo sie noch gar keinen Farbstoff enthält. Werden nämlich die Raupen kurz vor der letzten Häutung und Verpuppung in eine andere Umgebung gebracht, so hat meist

die erste Umgebung den größten Einfluß auf die Färbung, obgleich die zweite, unter der alten angelegte neue Haut noch gar keinen Farbstoff enthält. In neuerer Zeit ist zwar Šečerov dafür eingetreten, daß die Farbenanpassungen der Bartgrundel nach dem Wienerschen Prinzip der Farbenphotographie zustandekommen, doch sind seine wenigen Angaben über die Farbänderung ausgeschnittener Hautstücke nicht geeignet, dies zu beweisen, zumal wenn man beachtet, daß die geblendeten Fische auch auf hellem Grund ihr dunkelrotbraunes Kleid nicht verändern, sondern dauernd behalten. Sollten die Augen wirklich nur zur Farbenanpassung bei Gegenüberstellung von Hell und Dunkel, dagegen nicht bei der Gegenüberstellung zweier farbiger Untergründe notwendig sein? Neuerdings hat sich auch K. v. Frisch gegen Šečerow ausgesprochen.

ε_4) Die Farbveränderungen des Feuersalamanders auf schwarzem und gelbem Grunde, welche Kammerer nach jahrelanger Züchtung erhielt, sind selbstverständlich nicht mit Farbenphotographie zu vergleichen. Tiere, die auf Lehmboden gehalten wurden, zeigten ein Ueberwiegen der gelben Färbung, während bei Tieren auf schwarzer Humuserde das Gelb zugunsten des Schwarz arg reduziert wurde. Die Besprechung der beschränkten Vererbbarkeit dieser Farbenanpassungen gehört nicht in diesen Artikel. Dagegen muß hier noch erörtert werden, weshalb diese und die vorher aufgezählten Farbveränderungen in dem Kapitel über die notwendigen äußeren Faktoren besprochen und nicht für jenes über die abändernden aufgespart worden sind. Es ist dies deswegen geschehen, weil in diesen Fällen für das Zustandekommen der Schutzfärbung für eine bestimmte Umgebung eben diese Umgebung notwendig ist. Dadurch unterscheiden sich diese Fälle von Schutzfärbung von jenen anderen, bei denen letztere durch innere Faktoren allein hervorgerufen wird, und bei denen die Uebereinstimmung mit der Farbe der Umgebung nur dadurch erzielt wird, daß die Tiere das mit ihrer Färbung übereinstimmende Milieu aufsuchen resp. die Eier darin absetzen.

4. Der Einfluß der Temperatur. 4a) Die drei physiologischen Kardinalpunkte der Temperatur. Wie das Leben überhaupt, so ist auch die Entwickelung der Tiere nur innerhalb gewisser Temperaturgrenzen möglich. Die untere Temperaturgrenze, bei der die Entwickelung gerade noch möglich ist, nennt man das Minimum, die obere das Maximum, und dazwischen, doch viel näher dem Maximum als dem Minimum, liegt jene Temperatur, welche für die Entwickelung der Tiere am günstigsten ist, das Optimum. Die Lage dieser drei Kardinalpunkte ist von den Lebensbedingungen der betreffenden Tierformen abhängig. Eier von Tieren, welche in der kalten Jahreszeit laichen, können sich noch bei tieferen Temperaturen entwickeln als solche Eier, die in den wärmeren Monaten abgelegt werden, und umgekehrt ist das Maximum bei den ersteren eher erreicht als bei den letzteren. Das Maximum kann übrigens, wie Davenport und Castle gezeigt haben, durch Akklimatisation nach oben hin verschoben werden. Von Krötenlarven, die sich bei 24 bis 25° C entwickelt haben, starb nämlich keine bei Temperaturen unter 43° C, während andere, die bei 15° aufgewachsen waren, schon bei 41° C verendeten, auch wenn sie dieser Temperatur nur kurze Zeit ausgesetzt worden waren. Im folgenden sind die physiologischen Kardinalpunkte der Temperatur für die Entwickelung einiger Tiere in einer Tabelle angegeben, die teilweise Davenports Experimental Morphology entnommen wurde:

Tier	Minimum	Optimum	Maximum	Autor
Forellen- und Lachseier	Bei 0° Entwickelung noch möglich	—	12 bis 15° C	Rauber
Rana fusca	c. 0° C	22 bis 24° C	24 bis 26° C	O. Hertwig
Rana esculenta	—	—	32 bis 33° C	O. Hertwig
Rana virescens	3° C	30° C	—	Lillie u. Knowlton
Bufo lentiginosus	6° C	32° C	—	Lillie u. Knowlton
Planaria torva. Regeneration des Kopfes	3° C	29,7° C	32 bis 33° C	Lillie u. Knowlton
Huhn	25° C	38° C	42° C	Rauber

4b) Die Unterbrechungsmöglichkeit der Entwickelung durch Erniedrigung der Temperatur unter das Minimum ist eine nicht nur in theoretischer, sondern auch in praktischer Hinsicht wichtige Frage, welche namentlich beim Huhn genau untersucht worden ist, und zwar am eingehendsten von Kaestner. Derselbe fand, daß die Unterbrechungsmöglichkeit abnimmt, je weiter die Ent-

Digitized by Google

wickelung fortschreitet. In den ersten 3 Tagen sinkt das Maximum der Unterbrechungsmöglichkeit rasch, dann langsamer bis zum 10. Tage und von da an kaum merklich. Nach 6-stündiger Bebrütung konnte die Entwickelung 16 Tage lang unterbrochen werden. Freilich entstehen dann Mißbildungen, die jedoch ausbleiben, wenn die Unterbrechung nur bis zu 7 Tagen gedauert hat. Am Ende der Bebrütung kann die Entwickelung noch 24 Stunden unterbrochen werden. „Daß in allen, auch den spätesten Stadien, die Entwickelung bei der Abkühlung wirklich still steht, zeigt sich, wenn man nach Wiederaufnahme der Bebrütung diese bis zu Ende durchführt; das Auskriechen des fertigen Hühnchens geschieht dann regelmäßig um so viel Tage über die normale Bebrütungsdauer, als die Unterbrechung gedauert hat, einerlei, ob dies auf einem frühen oder späten Stadium geschehen war." Bei Rana fusca fand O. Schultze dasselbe wie Kaestner beim Huhn: Die Entwickelung kann um so weniger lange unterbrochen werden, je weiter sie bereits vorgeschritten ist, doch konstatierte er, daß bei 0° die Entwickelung zwar arg verlangsamt, aber doch nicht völlig sistiert ist. Wie praktisch die Unterbrechungsmöglichkeit der Entwickelung bei Ascaris megalocephala für den Beobachter und Experimentator ist, darauf hat Boveri wiederholt hingewiesen.

4c) Die Beschleunigung der tierischen Entwickelung durch Erhöhung der Temperatur und die Reaktions-Geschwindigkeitstemperaturregel. Daß steigende Temperatur bis zu einem gewissen Grade die Entwickelungsgeschwindigkeit erhöht, wußte man längst. Driesch publizierte darüber eine kleine Tabelle, die sich auf die Entwickelungsgeschwindigkeit von Sphaerechinus bezog, doch rühren viel ausführlichere Messungen von O. Hertwig und Lillie und Knowlton an Amphibienkeimen und von Peter und neuerdings von J. Loeb an Seeigelentwickelungsstadien her. Das Verdienst aber, zum ersten Male den Temperaturkoeffizienten für 10° für die Entwickelungsgeschwindigkeit berechnet zu haben, gebührt Cohen, der dazu die Daten von O. Hertwig benutzte. Dieser Temperaturkoeffizient Q_{10} ist das Verhältnis des Geschwindigkeitskoeffizienten k bei x + 10° zu dem bei x°.

$$Q_{10} = \frac{k_{x+10}}{k_x}.$$

α) Berechnung von Q_{10} für Seeigel- und Froschkeime. Nach Peter ist Q_{10} für die Entwickelung von Sphaerechinus = 2,15 i. M., für die Entwickelung von Echinus = 2,13 i. M., für die Entwickelung von Rana = 2,86 i. M. J. Loeb maß die Zeit, welche zwischen Befruchtung und erster Furchung bei verschiedenen Temperaturen verstrich und fand bei Strongylocentrotus purpuratus für Q_{10} im Mittel 2,86, was mit dem mittleren Temperaturkoeffizienten für 10° bei Rana übereinstimmt. Es wird also die Entwickelungsgeschwindigkeit bei einer Temperatursteigerung um 10° verdoppelt bis verdreifacht.

β) Q_{10} ist bei niederen Temperaturen größer als bei höheren. Das gilt z. B. für die Zeit der Organanlage beim Frosche, nach den Berechnungen von Peter, der dazu die Angaben von Oscar Hertwig benutzte. Er fand:

$$Q_{10}\,(2{,}5 \text{ bis } 14{,}5^\circ) = 3{,}28$$
$$\text{und } Q_{10}\,(10 \text{ bis } 24^\circ) = 2{,}26.$$

Noch viel größere Werte für Q_{10} bei niederen Temperaturen erhielt J. Loeb bei der Messung der Furchungsgeschwindigkeit des Arbaciaeies, wie folgende Tabelle zeigt:

Temperatur-intervalle	Temperaturkoefficient für 10° für die Furchungsgeschwindigkeit des Arbacia-Eies
7 — 17°	7,3
8 — 18°	= 6,0
9 — 19°	≥ 4,0
10 — 20°	= 3,9
12 — 22°	= 3,3
15 — 25°	= 2,6
16 — 26°	= 2,6
17,5 — 27,5°	= 2,2
20 — 30°	= 1,7

γ) Q_{10} ist für verschiedene Stadien verschieden groß. Peter fand:

Sphaerechinus,	Furchung:	$Q_{10} = 2{,}29$
„	spätere Stadien:	$Q_{10} = 2{,}03$
Echinus,	Furchung:	$Q_{10} = 2{,}30$
„	spätere Stadien:	$Q_{10} = 2{,}23$
Rana,	Furchung:	$Q_{10} = 2{,}23$
„	spätere Stadien:	$Q_{10} = 3{,}34$

δ) Die Uebereinstimmung des Beschleunigungsgrades tierischer Prozesse mit dem Beschleunigungsgrad chemischer Reaktionen durch Temperatursteigerung. Für die meisten chemischen Reaktionen ist Q_{10} bekanntlich = 2 bis 3, d. h. es wird die Reaktionsgeschwindigkeit bei Erhöhung der Temperatur um 10° verdoppelt bis verdreifacht. Sehen wir zunächst von den großen Werten ab, die Q_{10} bei niederen Temperaturen bei der Furchungsgeschwindigkeit des Arbaciaeies aufweist, so ergibt sich eine eklatante Uebereinstimmung zwischen den Werten für Q_{10} auf chemischem und entwickelungsgeschicht-

Digitized by Google

lichem Gebiete. Man kann daraus schließen, daß bei den morphologischen Veränderungen während der Entwickelung chemische Prozesse beteiligt sind. Daß die Entwickelung sich nur aus chemischen Prozessen zusammensetzt, das geht jedoch aus den vorliegenden Daten nicht hervor. Vor einer solchen Schlußfolgerung müssen uns besonders auch die hohen Werte für Q_{10} bei niederen Temperaturen für die Furchungsgeschwindigkeit des Arbaciaeies warnen. Da Loeb fand, daß Q_{10} für die Oxydationsgeschwindigkeit im Arbaciaei bei niederen Temperaturen nicht derartig hohe Werte wie für die Furchungsgeschwindigkeit annimmt, so ist der einfachste Schluß aus dem Loebschen Befunde wohl der, daß an den Entwickelungsprozessen, abgesehen von chemischen Vorgängen, noch andere beteiligt sind, für die ganz andere Temperaturkoeffizienten gelten. Allerdings muß auch beachtet werden, daß Q_{10} bei chemischen Reaktionen bei niederen und höheren Temperaturen ebenfalls recht verschiedene Werte aufweisen kann.

Was für chemische Prozesse, abgesehen von Oxydationen, bei der Entwickelung der Tiere eine Rolle spielen, darüber weiß man bis jetzt noch so gut wie nichts. Die Furchung ist zwar durch das auffällige Geschehnis der Vermehrung der Kernbestandteile auf Kosten des Protoplasmas charakterisiert, doch findet nicht etwa während der Furchung eine Synthese von Nucleinsäure statt. Masing fand wenigstens in ungefurchten Eiern und späten Furchungsstadien von Seeigeln dieselbe Menge Nucleinsäure.

5. Der Einfluß der Wasserzufuhr. Ein gewisser Wassergehalt ist eine unbedingte Notwendigkeit für die Organismen. Sinkt derselbe unter ein Minimum, so hören die Lebenstätigkeiten entweder gänzlich und für immer auf oder sie werden latent und können wieder in vollständige Aktion treten, wenn für neue Wasserzufuhr gesorgt wird, wie man das bei Protozoen, Rädertierchen, Tardigraden und gewissen Nematoden (Tylenchus devastatrix und Strongylus rufescens), sowie bei den Eiern niederer Krebse, den Statoblasten von Bryozoen und den Gemmulis der Süßwasserschwämme beobachtet hat. Ein gewisses Quantum Wasser ist also eine ganz allgemeine Entwickelungs- und Lebensbedingung. Von einem bestimmten bedeutenderen Quantum an als das ist, welches für die allgemeinen Lebenserscheinungen notwendig ist, spielt nun aber das Wasser noch eine ganz spezielle Rolle, nämlich bei der Volumenzunahme tierischer Keime während der Entwickelung, beim Wachstum derselben, wie man auch sagen kann, wenn man sich der Definition Davenports von Wachstum als Volumenzunahme anschließt.

5a) Die Bedeutung der Wasserzufuhr für das Wachstum. Die grundlegenden Untersuchungen stammen von Davenport her. Derselbe stellte exakte Wägungen an Froschembryonen an und zeigte damit, daß bei denselben die Volumenzunahme anfangs ausschließlich durch Wasseraufnahme erfolgt, wie aus folgender Tabelle hervorgeht:

Datum	Tage nach dem Ausschlüpfen	Durchschnittl. Totalgewicht	Gewicht der Trockensubstanz	Gewicht des Wassers	% Wasser
2. Mai	1	1,83 mg	0,80 mg	1,03 mg	56 %
3. „	2	2,00 „	0,83 „	1,17 „	59 %
6. „	5	3,43 „	0,80 „	2,63 „	77 %
8. „	7	5,05 „	0,54 „	4,51 „	89 %
10. „	9	10,40 „	0,72 „	9,68 „	93 %
15. „	14	23,52 „	1,16 „	22,36 „	96 %
10. Juni	41	101,0 „	9,9 „	91,1 „	90 %
23. „	84	1989,9 „	247,9 „	1742,0 „	88 %

Man sieht aus dieser Tabelle, daß das Totalgewicht der Larven bis zum 9. Tage nach dem Ausschlüpfen, und das Gewicht des Wassers ganz bedeutend zugenommen haben, ohne daß eine Vermehrung der Trockensubstanz eingetreten wäre. Eher kann man bei letzterer von einer geringfügigen Abnahme sprechen. Erst am 15. Mai wurde eine kleine Vermehrung der Trockensubstanz konstatiert, ein Beweis, daß jetzt die Larven zu fressen begonnen hatten. Der Prozentgehalt an Wasser hat zu dieser Zeit den Höhepunkt erreicht (96 %). Von nun ab sieht man ihn wieder wegen Zunahme des Trockensubstanzgewichtes sinken, während das Gewicht des Wassers in den Larven weiter zunimmt. Daraus ergibt sich also, daß die Volumenzunahme der Froschlarven in der ersten Zeit nach dem Ausschlüpfen ausschließlich, später aber noch zum größten Teile durch aufgenommenes Wasser hervorgerufen wird. Davenport hat die

Digitized by Google

letzte Kolumne obenstehender Tabelle auch graphisch dargestellt und folgende Kurve erhalten:

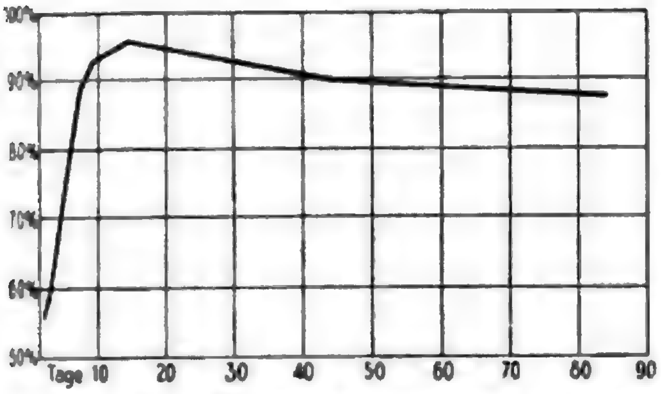


Fig. 50. Kurve des prozentualen Wassergehaltes der Froschlarven vom 1. bis 84. Tage nach dem Ausschlüpfen. Nach Davenport. Aus Korschelt und Heider.

Diese Wassergehaltskurve ist nun interessanterweise, worauf ebenfalls Davenport aufmerksam gemacht hat, ganz außerordentlich jener ähnlich, welche vor langer Zeit G. Kraus für den Wassergehalt der ersten 5 Internodien, von dem Scheitel an gerechnet, von Warmhauspflanzen von Heterocentron roseum Hook. et Arm. konstruiert hat, wie ein Vergleich der beiden Figuren 50 und 51 ohne weiteres erkennen läßt.

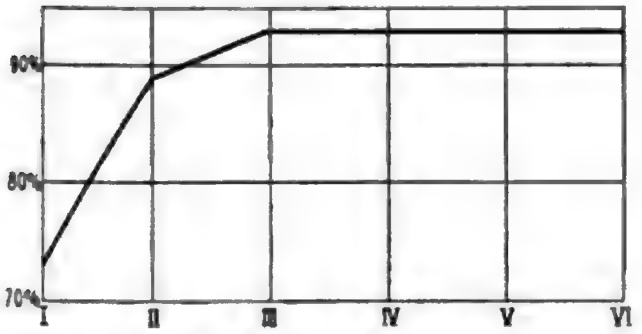


Fig. 51. Kurve des prozentualen Wassergehaltes in 5, von der Spitze (I) an aufeinanderfolgenden Internodien von Warmhauspflanzen von Heterocentron roseum Hook. et Arm. Nach Kraus. Aus Davenport. Aus Korschelt und Heider.

Diese wichtigen Befunde Davenports wurden durch die ausgedehnten Untersuchungen Schapers vollkommen bestätigt und durch eine Menge von Einzelheiten erweitert. Von diesen letzteren sei nur erwähnt, daß während der Verwandlung der prozentuale Wassergehalt von 90,13 % auf 88,19 % und der absolute von 5324 auf 2540 mg sinkt. Nach der Verwandlung nimmt dann der prozentuale Wassergehalt immer weiter allmählich ab, während der absolute immer mehr steigt, so daß bei einem Frosch von ca. 5 Jahren der erstere 76,40 %, der letztere dagegen 205460 mg betrug.

5b) Wie gelangt das Wasser in die Keime? Die Antwort auf diese Frage scheint sehr einfach zu sein. Man braucht nur anzunehmen, daß bei den chemischen Prozessen, die im Verlaufe der Entwickelung stattfinden, osmotisch wirksame Substanzen gebildet werden, und daß die Oberflächen der Keime halbdurchlässige Membranen repräsentieren, dann hat man sofort einen Grund für das Eindringen von Wasser in die Keime. So einfach liegen nun aber die Verhältnisse, zum mindesten in vielen Fällen, sicher nicht. Das haben die Untersuchungen von Backman und Runnström über den osmotischen Druck von Eiern und Larvenstadien der Frösche sowie jene von Białaszewicz über den osmotischen Druck desselben Materials und über den von Eiern und Embryonalstadien des Huhnes deutlich bewiesen.

a) Die Untersuchungen über den osmotischen Druck in den Eiern und Larvenstadien der Frösche. Backman und Runnström erhielten folgende Resultate:

	Δ
Fertige Ovarialeier	$-0{,}48^0$
Ungefurchte, befruchtete Eier	$-0{,}045^0$
Embryonen, 5 Tage alt	$-0{,}23^0$
Kaulquappen, 20 bis 25 Tage alt	$-0{,}405^0$
Serum des metamorphosierten Frosches	$-0{,}465^0$
Gallerthüllen	$-0{,}015^0$
Wasser des Tümpels, aus dem die Eier geholt wurden	$-0{,}06^0$

Die beiden schwedischen Forscher haben also die wichtige Entdeckung gemacht, daß der osmotische Druck in den Froscheiern nach der Befruchtung abnimmt, und zwar so stark, daß er in den befruchteten ungefurchten Eiern nur $^1/_{10}$ vom osmotischen Druck des Ovarialeies und des Serums vom ausgewachsenen Frosch beträgt. Er stimmt dagegen mit dem osmotischen Druck des Mediums überein, in dem sich die Eier entwickeln. Die Tabelle zeigt weiter, daß der osmotische Druck im Laufe der Entwickelung wieder zunimmt, so daß er bei Embryonen von 5 Tagen bereits wieder die Hälfte vom osmotischen Druck des ausgewachsenen Tieres repräsentiert.

Um die anfängliche Verminderung und die später wieder einsetzende Vermehrung des osmotischen Druckes in den Froscheiern und -keimen zu erklären, haben die beiden Forscher die Vermutung ausgesprochen, daß die Folge der Befruchtung eine Zustandsänderung der Kolloide des Eies

mit Adsorption der Kristalloide ist. Indem nun die letzteren im Verlaufe der Entwickelung allmählich wieder entbunden werden, kommt die Wiederzunahme des osmotischen Druckes zustande, an der sich auch noch osmotisch wirksame Substanzen beteiligen können, welche aus der Zersetzung von Dottermaterial entstanden sind.

Die von Backman und Runnström gefundenen Tatsachen wurden von Białaszewicz bestätigt und ergänzt, der dagegen dem eben geschilderten Erklärungsversuch der Ab- und Zunahme des osmotischen Druckes während der Entwickelung nicht beistimmt.

β) Die Untersuchungen über den osmotischen Druck in den Eiern und Embryonalstadien des Huhnes. Sehr interessante Resultate hat die neue Arbeit von Białaszewicz in bezug auf den osmotischen Druck in Eiern und Embryonen des Huhnes ergeben, der ebenso wie in den Untersuchungen von Backman und Runnström durch Messung der Gefrierpunktserniedrigung festgestellt wurde. Der polnische Forscher stellte zunächst auch für das Huhn die Tatsache fest, daß der osmotische Druck im Dotter des Eies während der Anfangsstadien der Entwickelung zunächst abnimmt, so daß derselbe im gelegten Ei bedeutend geringer als im Ovarialei ist. Die Abnahme des osmotischen Druckes hält sogar noch während der ersten Bebrütungstage an, nimmt aber vom sechsten Bruttage an beständig wieder zu, so daß er nach 18 Tagen bereits wieder den Wert $\Delta = 0{,}601^0$ erreicht hat und nur noch wenig vom osmotischen Druck im Dotter der ausgewachsenen Eizelle ($\Delta = 0{,}613^0$) abweicht. Höchst merkwürdig ist nun, daß das äußere Milieu der Hühnerembryonen, die Amnionflüssigkeit, während der Anfangsstadien der Entwickelung einen größeren osmotischen Druck besitzt als der Embryo, der aber trotzdem während dieser Zeit Wasser aus seiner Umgebung aufnimmt. In den Mittelstadien der Entwickelung wird zwar die Amnionflüssigkeit isotonisch mit den Säften des Embryos, aber auch das genügt natürlich noch nicht, um die Zunahme an Wasser durch Osmose zu erklären. Erst in den Endstadien der Embryonalentwickelung ist das äußere Milieu der Embryonen hypotonisch. Białaszewicz hält die Annahme, daß es sich bei der Wasseraufnahme der Hühnerembryonen um Quellungswasser handelt, das nach Wolfgang Ostwald bei dem Wachstum durch Wasseraufnahme der Amphibienkeime eine ziemlich bedeutende Rolle spielt, für weniger wahrscheinlich als die Vermutung, daß die Keimepithelien keine semipermeabelen Membranen sind, sondern beim Transport von Wasser aus der anfangs hypertonischen Amnionflüssigkeit in den Keim oder von osmotisch aktiven Substanzen aus demselben in die erstere Arbeit leisten. Mag nun Ostwald oder Białaszewicz Recht haben, richtig ist jedenfalls der Vergleich der in der hypertonischen Amnionflüssigkeit befindlichen Hühnerembryonen mit den Teleostiern des Meerwassers, deren Blut auch einen geringeren osmotischen Druck aufweist als das umgebende Medium, die aber trotzdem darin wachsen.

6. Der Einfluß von Sauerstoff. 6a) Die Notwendigkeit des Sauerstoffes für die Entwickelung. Daß das Hühnerei zu seiner Entwickelung des Sauerstoffes bedarf, auch wenn noch kein Blut vorhanden ist, ist schon seit Schwann bekannt; der Nachweis aber, daß Sauerstoff schon für die Furchung unentbehrlich ist, stammt erst aus neuerer Zeit. Wird aus Kulturen von Seeigeleiern aller auspumpbarer Sauerstoff entfernt, so tritt nach J. Loeb keine Furchung ein. Auch Versuche mit Eiern von Ctenolabrus ergaben demselben Forscher das gleiche Resultat, ja selbst die Eier der Ascariden, welche sich nach Bunge mehrere Tage lang im O-freien Medium bewegen können, bedürfen zu ihrer Entwickelung des Sauerstoffes, wie Halley fand und Samassa bestätigte. Sonderbarerweise sah aber J. Loeb die Eier von Fundulus sich in einer Wasserstoffatomsphäre 12 bis 15 Stunden lang furchen, und konnten Samassa und nach ihm Godlewski jun. auch bei Rana temporaria im O-freien Medium die Furchung bis zur Bildung von Keimblasen mit verschieden großen Zellen vor sich gehen sehen. Natürlich beweisen diese beiden letzteren Befunde nur, daß zur Ermöglichung der Furchung von Fundulus und Rana keine O-Zufuhr von außen notwendig ist, da in den dotterreichen Eiern und ihren Hüllen noch genügend O vorhanden gewesen sein kann, der den Ablauf der Furchung bis zu einem gewissen Punkte gestattete.

6b) Kann die Entwickelung durch Sauerstoffentzug zeitweilig unterbrochen werden? Die Frage hat ebenso wie die entsprechende im Kapitel über die Wärme (S. 599) vor allen Dingen praktisches Interesse, und in der Tat hat Halley bei Ascaris megalocephala die Sauerstoffentziehung zur Sistierung der Entwickelung verwendet. Samassa bewahrte die Eier desselben Spulwurmes 45 Tage in N, 50 Tage in CO_2 und 66 Tage in N_2O auf, ohne daß dadurch ihre Weiterentwickelung aufgehoben worden wäre. Nach Schwann sind Hühnereier noch nach 24-stündigem Aufenthalt

Digitized by Google

in einer H-Atmosphäre zur Weiterentwickelung fähig, nach 30-stündiger Bebrütung in H-Gas dagegen nicht mehr. Die Unterbrechungsmöglichkeit der Entwickelung nimmt nach Untersuchungen von J. Loeb an Funduluseiern und Embryonen mit fortschreitender Entwickelung ab.

6c) Der Unterschied im Sauerstoffverbrauch zwischen unbefruchteten und befruchteten Eiern wurde von O. Warburg bei Seeigeln nachgewiesen. Derselbe stellte nämlich fest, daß die befruchteten Eier sechsmal so viel Sauerstoff verbrauchen als die unbefruchteten, und daß eine ähnliche Steigerung der Oxydationsprozesse auch an unbefruchteten Eiern durch solche Mittel herbeigeführt werden kann, die Parthenogenese zur Folge haben. Dringen bei der Befruchtung mehrere Spermatozoen in das Ei ein, so addieren sich die Wirkungen derselben nach Warburgs Untersuchungen nicht, vielmehr ist der Sauerstoffverbrauch der polyspermen Eier nur ganz unwesentlich höher als der monospermer.

6d) Sind Entwickelung und Oxydation unter allen Umständen miteinander verkettet? Das ist eine Frage, deren Lösung wir ebenfalls O. Warburg verdanken. Da Sauerstoff zur Entwickelung notwendig ist, und die Oxydationsprozesse in der Eizelle durch die Befruchtung so sehr gesteigert werden, so liegt es eigentlich nahe, an eine strenge Parallelität der beiden Erscheinungsreihen zu denken. Trotzdem existiert dieselbe nicht, wie verschiedene Versuchsreihen Warburgs, von denen wir drei schildern wollen, beweisen. Warburg gelang es nämlich, durch geringe Mengen von Phenylurethan (ca. $^1/_{2000}$-n) die Entwickelung der Eier von Strongylocentrotus so zu hemmen, daß nach 130 Minuten zwar Kernveränderungen, aber noch keine Furchung eingetreten war, während nach derselben Zeit im normalen Seewasser bereits 4 Zellen gebildet worden waren. Trotz dieser Entwickelungshemmung war aber die Atmung der Eier kaum herabgesetzt. In Ammoniakseewasser (50 ccm Seewasser + 2 ccm $^1/_{10}$-n NH_3) findet keine Furchung befruchteter Eier statt, obwohl die Eier in demselben sogar noch um 10 % intensiver atmen als in normalem Seewasser, und in Wasser mit Au-, Ag- oder Cu-Zusatz in der Konzentration 10^{-5}-n blieb die Furchung befruchteter Eier von Strongylocentrotus entweder ganz aus oder war zum mindesten stark verlangsamt, obwohl die Atmung bis um 63 % gesteigert sein konnte. Man kann auf Grund dieser Experimentalresultate also mit Warburg sagen: „Die sichtbaren Veränderungen im sich entwickelnden Ei sind keine Bedingung für die Aenderung der Oxydationen nach der Befruchtung. Da andererseits nach der Loeb'schen Entdeckung die Oxydationsprozesse eine Bedingung für die sichtbaren Veränderungen sind, so sind diejenigen chemischen Prozesse, als deren Maß man den Sauerstoffverbrauch betrachten darf, den morphologischen Prozessen übergeordnet."

6e) Das Wachsen des Sauerstoffverbrauches mit fortschreitender Entwickelung. Nach den Untersuchungen von O. Warburg steigt bereits während der Furchung der Seeigeleier der Sauerstoffverbrauch langsam an, und zwar stellte er den letzteren für das 2-Zellenstadium von Strongylocentrotus auf 0,438 ccm, für das 64-Zellenstadium auf 0,612 ccm fest. Die Zunahme des Sauerstoffverbrauches stimmt also nicht entfernt mit der Zunahme der Kerne überein. Als Ursache für die Steigerung des O-Verbrauches macht er das Anwachsen der Oberfläche der Keime verantwortlich. Auch schon vor Warburg war die Zunahme der Atmungsintensität mit fortschreitender Entwickelung konstatiert worden. So von Godlewski jun. bei der Entwickelung des Froscheies, bei dem auch Bataillon zu gleichem Ergebnisse gekommen ist. Indem derselbe nämlich die Froscheier in verdünntes Barytwasser, welches noch nicht schädlich wirkte, brachte, konnte er an der Menge des ausgefallenen $BaCO_3$ die Zunahme der ausgeschiedenen Kohlensäure mit fortschreitender Entwickelung deutlich nachweisen. Weiteres über den embryonalen Gaswechsel ist in dem Artikel „Atmung" nachzulesen.

6f) Kann die Entwickelung in reinem Sauerstoff beschleunigt werden? Pott fand, daß die Entwickelung der Hühnerembryonen in reinem Sauerstoffgas in den ersten beiden Wochen weder beschleunigt noch verzögert ist. Zu demselben negativen Resultat gelangte J. Loeb bei den Eiern von Ctenolabrus, ja, Samassa stellte bei Ascaris megalocephala in reinem Sauerstoff sogar eine Verzögerung und in O unter $2^1/_4$ Atm. Druck eine sofortige Sistierung der Entwickelung und den Tod der Eier nach längstens 11 Tagen fest, während Luft unter diesem Druck nicht irgendwie alterierend auf den Entwickelungsverlauf einwirkt.

6g) Hat die Lage des Keimes zur Sauerstoffquelle einen Einfluß auf die Lokalisation von Bildungsprozessen? α) Negatives Resultat Rouxs an Froschkeimen. Roux aspirierte zur Entscheidung der aufgeworfenen Frage Froscheier in eine Glasröhre und sah dann

Digitized by Google

zu, ob die einseitige Sauerstoffzufuhr einen Einfluß auf den Entstehungsort von Organen hat. Das Resultat war negativ.

β) Positives Resultat von J. Loeb bei der Regeneration des Tubulariaköpfchens. Steckt man ein herausgeschnittenes Stammstück von Tubularia mit einem Ende in den Sand, so bildet nur das eine frei ins Wasser ragende ein neues Köpfchen, während beide Enden Köpfchen produzieren würden, wenn beide von Meerwasser umspült würden. Daß es nicht der Kontakt ist, welcher die Köpfchenbildung unterdrückt, geht aus einem Experiment hervor, bei dem das Stammstück in die Spitze einer Pipette hineingesteckt und die Pipette in den Sand gestellt wurde, so daß eine Schnittfläche frei ins Wasser ragte, während die andere zwar auch ins Wasser ragte, aber nur in die innerhalb der Pipettenröhre abgeschlossene kleine Menge, wo die Sauerstoffversorgung natürlich schlechter als außerhalb war. Nur das frei in das Wasser ragende Ende produzierte ein neues Köpfchen.

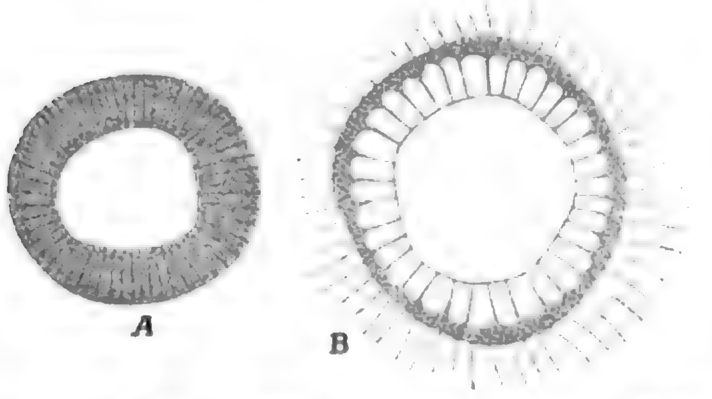


Fig. 52. A Kleine, dickwandige, trübe Blastula aus einer K-freien Kultur. B Normale Blastula aus derselben Mischung mit K. Die Larven in der letzteren wurden in der Folge zu normalen Pluteis, während die in der K-freien Lösung als kränkliche, trübe Blastulae abstarben. Nach Herbst.

6h) Hat die einseitige Sauerstoffzufuhr einen Einfluß auf das Wandern von Zellen innerhalb des sich entwickelnden Organismus? Die positive Beantwortung dieser Frage hat zwar einen hohen Grad von Wahrscheinlichkeit für sich, doch liegen bis jetzt noch keine einwandfreien Experimente vor, welche ihr Aussprechen rechtfertigen würden.

7. Die zur Entwickelung notwendigen anorganischen Stoffe. Die Frage, welche anorganischen Stoffe für die normale Entwickelung der Tiere notwendig sind, hat Herbst auf die Weise zu lösen versucht, daß er die Seetiere in den Kreis seiner Betrachtungen zog, welche in einem Medium von ganz bestimmter chemischer Zusammensetzung leben und sich entwickeln. Ist diese bestimmte Stoffkombination wirklich für die Entwickelung und Lebenserhaltung der Meertiere notwendig, oder genügt es, wenn den Tieren eine Salzlösung von demselben osmotischen Druck, wie ihn das Meerwasser aufweist, zur Verfügung steht? Systematische Untersuchungen über diese Frage waren vor den Arbeiten Herbsts überhaupt noch nicht angestellt worden. Nur Pouchet und Chabry und etwas später J. Loeb hatten das Thema kurz gestreift; die ersteren hatten mittels Kalium- oder Natriumoxalates den Kalk des Meerwassers zu entfernen resp. zu vermindern versucht und die Wirkung des so erhaltenen kalkarmen Seewassers auf die Entwickelung der Seeigellarven studiert, während J. Loeb bei seinen Regenerationsversuchen mit Tubularia mesembryanthemum feststellte, „daß Kalium in der Lösung in geringer Menge notwendig enthalten sein muß, wenn Regeneration des Polypen stattfinden soll, daß aber zur Bildung normaler Polypen und für ein normales Wachstum auch Magnesium erforderlich ist. Diese beiden Substanzen neben NaCl (das möglicherweise ersetzbar ist) sind aber für Regeneration und Wachstum der Tubularia ausreichend".

7a) Die Resultate Herbsts über die zur Entwickelung und Lebenserhaltung notwendigen anorganischen Stoffe. *α*) Die zur Entwickelung notwendigen anorganischen Stoffe. Wie Herbst in seiner ersten Arbeit von 1897 mitteilt, hat er die Notwendigkeit bestimmter Stoffkombinationen für die normale Entwickelung der Seeigellarven auf zweierlei verschiedene Arten und Weisen festgestellt. Einmal nämlich verfuhr er so, daß er zu-

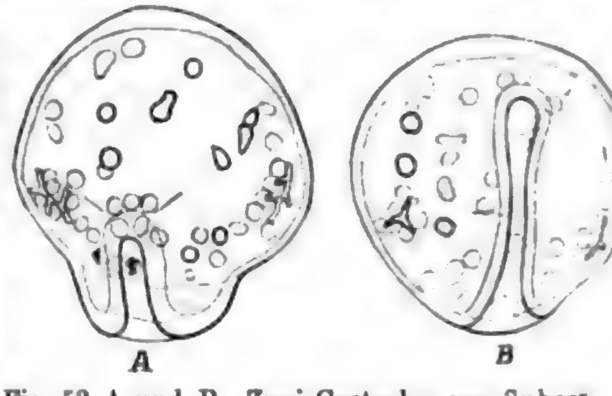


Fig. 53 A und B. Zwei Gastrulae von Sphaerechinus granularis aus Mg-freiem Seewasser. Nach Herbst.

nächst nur eine Lösung von Chlornatrium allein nahm und daß er parallel damit andere Kulturen ansetzte, welche neben NaCl noch eines oder auch mehrere der im Meerwasser vorhandenen Salze enthielten, und daß er mit dieser Kombination solange fortfuhr, bis er eine Mischung vorfand, in der sich die Larven normal entwickelten. Zweitens aber — und das tat er bei der größten Mehrzahl seiner Experimente — prüfte er die Unentbehrlichkeit eines Stoffes auf die Weise, daß er zu den künstlichen Seewassermischungen alle Stoffe bis auf den

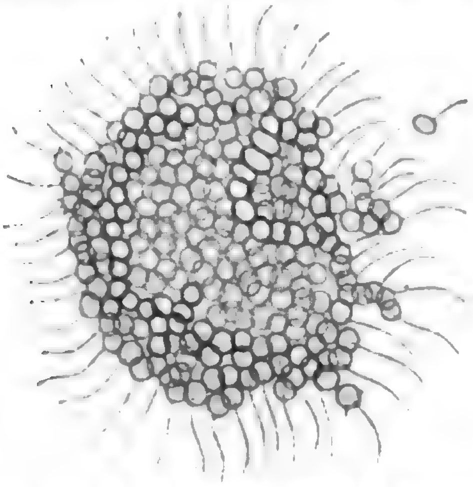


Fig. 54. In Zellen sich auflösende Blastula von Echinus microtuberculatus aus Seewasser ohne Ca. Nach Herbst.

zufügte, welchen er auf seine Notwendigkeit hin untersuchen wollte. Herbst hat bei seinen Versuchen alle möglichen Fehlerquellen ins Auge gefaßt und natürlich vor allen Dingen auch darauf geachtet, daß die Mischungen, welche er auf ihre Wirkung hin prüfte, nicht etwa derartig in bezug auf ihren osmotischen Druck differierten, daß diese Differenz allein für die verschiedene Wirkung auf die sich entwickelnden Eier hätte verantwortlich gemacht werden können. Besondere Schwierigkeiten bereitete es, einen geeigneten Ersatz für NaCl zur

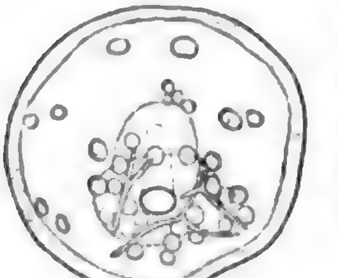
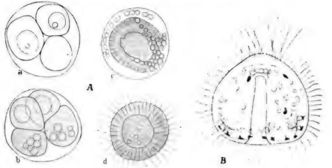


Fig. 55. Gastrula mit kurzem Urdarm und abnorm gelagerten Kalknadeln aus SO_4-freiem Seewasser. Nach Herbst.

Prüfung der Notwendigkeit von Natrium und einen solchen für Cl zur Entschleierung der Notwendigkeit dieses Jons zu schaffen, doch glückten schließlich die Versuche, als im ersteren Falle für NaCl eine isotonische Menge von $MgCl_2$ und im zweiten für das Chlorid das ameisensaure Salz des Natriums genommen wurde. Das Gesamtresultat der Herbstschen Untersuchungen war, daß er die Kationen Na, K, Mg und Ca und die Anionen Cl, SO_4, HCO_3 sowie einen ganz geringfügigen Ueberschuß der OH-Ionen über die H-Ionen als notwendig für den normalen Verlauf der Seeigelentwickelung erkannte. Für die hauptsächlichsten Resultate liefern beistehende Figuren 52 bis 57 das bildliche Beweismaterial.

In Figur 52 A ist eine Sphaerechinusblastula aus K-freiem Seewasser dargestellt. Dieselbe ist kleiner als eine Blastula aus derselben Seewassermischung mit K-Zusatz (Figur 52B), weist ein trübes Gewebeaussehen auf und besitzt nicht die vakuolige Beschaffenheit ihrer Wandung wie eine normale Blastula aus der Kontrollkultur. Während sich nun die Keime in der letzteren Zucht zu normalen Pluteis weiter entwickelten, stellten die trüben Blastulae ihre Entwickelung ein und starben nach ein paar Tagen ab. Noch früher macht sich der Einfluß des K-Mangels bei den Eiern von Echinus microtuberculatus geltend, die meist bereits schon während der Furchung absterben. Der Vergleich der beiden Figuren 53 A und B mit dem in Figur 57 dargestellten Pluteus läßt klar die Notwendigkeit des Magnesiums für den vollständigen normalen Entwickelungsablauf erkennen; und Figur 54 zeigt deutlich, daß es ohne Vorhandensein von Ca im umgebenden Medium nicht zur Bildung geschlossener Larven kommen kann. Die Notwendigkeit des SO_4-Ions ergibt sich aus einem Vergleich von Figur 55 mit Figur 57; und die Unentbehrlichkeit einer bestimmten Hydroxylionen-Konzentration kann man aus den Figuren 56A a bis d einerseits und aus den Figuren 56B und 56C andererseits erkennen. Die Figuren 56A a bis d repräsentieren vier Keime aus der Zucht ohne genügende OH-Ionenkonzentration und lehren, daß die Eier sich der letzteren gegenüber außerordentlich verschieden verhalten. Solche individuelle Verschiedenheiten kommen zwar auch in anderen Lösungen vor, die nicht alle notwendigen anorganischen Stoffe enthalten, nirgends tritt aber diese individuelle Verschiedenheit so sehr hervor wie in den Mischungen, die nicht die richtige Hydroxylionenkonzentration aufweisen. Die in den Figuren 56B und 56C dargestellten Larven stammen aus derselben Seewassermischung mit OH-Zusatz, und zwar wurde Figur 56B zu derselben Zeit gezeichnet wie die stehen gebliebenen Furchungsstadien und die krüppeligen Blastulae aus der OH-ärmeren Zucht. Die Not-

Digitized by Google



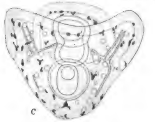


Fig. 56 Aa bis d. Keime aus künstlichem Seewasser ohne genügenden OH-Ionengehalt. B und C Larven aus derselben Mischung mit KOH-Zusatz. Zusammensetzung der Mischung: 3 % NaCl, 0,08 % KCl, 0,66 % $MgSO_4$, 0,13 % $CaCl_2$ und Tricalciumphosphat und Ferrum phosphoricum oxydulatum, soviel sich in der Flüssigkeit nach ca. 40 St. löste. Die Kultur mit KOH-Zusatz erhielt zu 20 ccm 6 Tropfen ½prozentiger KOH-Lösung, was für manche Eier schon zu hoch gegriffen war. Aa bis d und B zu derselben Zeit, C drei Tage später gezeichnet bei gleicher Vergrößerung. Nach Herbst.

wendigkeit der Carbonate resp. Bicarbonate endlich geht aus dem Vergleich von Figur 56C mit Figur 57 hervor, von denen die in der letzteren abgebildete Larve aus künstlichem Seewasser mit $Ca(HCO_3)_2$ stammt und im Gegensatz zu der in Figur 56C dargestellten Pluteuslarve ein vollständiges Skelett aufweist.

Der größte Teil der Herbstschen Experimente erstreckt sich auf die Entwickelung der Seeigeleier, doch hat er auch mit anderen Tieren eine Reihe von Versuchen angestellt, die ähnliche Resultate ergaben. Dazu gehören zunächst die Eier der Seesterne. Von Cölenteraten hat er gelegentlich Planulae von Cotylorhiza benutzt und außerdem die Loebschen Angaben über die zur Reparation der Tubulariaköpfchen notwendigen anorganischen Stoffe dahin ergänzt, daß er den normalen Verlauf derselben auch noch von dem Vorhandensein von Ca und SO_4 abhängig sein ließ. Die Herbstschen Resultate werden in ihrer Gesamtheit wahrscheinlich auf alle jene Tiere zu übertragen sein, welche im Inneren ihres Körpers denselben Salzgehalt wie das Meerwasser aufweisen. Ob dagegen alle von Herbst gefundenen Stoffe auch zur Entwickelung jener Meertiere notwendig sind, deren inneres Medium einen geringeren Gehalt an anorganischen Salzen besitzt als das Meerwasser, bedarf noch weiterer Untersuchungen.

β) Notwendigkeit einer bestimmten Stoffkombination zur Lebenserhaltung ausgebildeter Larven und

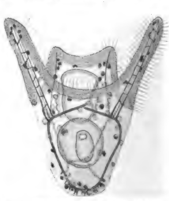


Fig. 57. Normaler Pluteus von Sphaerechinus granularis aus künstlichem Seewasser mit allen notwendigen Stoffen zum Vergleich mit den Fig. 52 bis 56. Nach Herbst.

Digitized by Google

Tiere. Es ist bekannt, daß viele wirbellose Tiere des Meeres auf gewissen Larvenstadien längere Zeit verharren. Deshalb erhebt sich die weitere Frage, ob zur Lebenserhaltung dieser Larven ebenfalls die eben aufgezählten anorganischen Stoffe notwendig sind, oder ob dazu ein mit dem Meerwasser isotonisches Medium genügt. Herbst hat an Pluteis von Seeigeln und Bipinnarien von Seesternen gezeigt, daß ersteres der Fall ist. Ja selbst für die Lebenserhaltung ausgebildeter Formen anderer Meertiere (Medusen, Polycladen, Ascidien und Acranier) konnte er die Notwendigkeit einer bestimmten Stoffkombination nachweisen.

γ) Die Bestätigung der Herbstschen Resultate durch J. Loeb. Die von Herbst bei der Entwickelung von Echinodermenlarven gefundenen Tatsachen sind im Laufe der Jahre an denselben Objekten von Loeb vollständig bestätigt worden. Dieses sei ganz besonders deswegen betont, weil manche geneigt sind, aus dem verschiedenen Wortlaut, den Loeb seinen Resultaten gibt, eine Verschiedenheit in den Resultaten Loebs und Herbsts herauszulesen. Loeb sagt nämlich: „Eine reine NaCl-Lösung ist für die Seeigeleier giftig. Dieselbe muß durch Zusatz anderer Stoffe (K, Mg, Ca) entgiftet werden." Herbst sagt: „Zur normalen Entwickelung der Seeigeleier genügt NaCl allein nicht, sondern es müssen dazu noch bestimmte andere Stoffe hinzugefügt werden, und es kann auch NaCl nicht durch einen anderen Stoff ersetzt werden." Die Notwendigkeit einer bestimmten Stoffkombination für den normalen Entwickelungsablauf der Echinideneier ist also von Loeb nur mit anderen Worten ausgedrückt worden als von Herbst. Loeb, der schon früher unabhängig von Herbst gefunden hatte, daß die Entwickelung des Seeigels, Arbacia, durch OH-Zusatz zum Meerwasser beschleunigt werden kann, hat auch die Angabe von Herbst über die Notwendigkeit eines geringfügigen Ueberschusses der Hydroxylionen über die Wasserstoffionen bestätigt und berechnet, daß die Hydroxylionenkonzentration für die Entwickelung von Strongylocentrotus purpuratus = oder > 10^{-6}n sein muß und bis $4 . 10^{-6}$n steigen darf. Aehnliche Resultate erhielt auch Warburg bei Strongylocentrotus lividus, bei 10^{-8}n OH keine Furchung, bei 10^{-6} normale Furchung und bei 10^{-3} wieder keine Furchung.

δ) Ueber das Vorkommen noch anderer als der namhaft gemachten notwendigen Stoffe in wirbellosen Tieren. In manchen Seetieren kommen interessanterweise Stoffe vor, die nur in minimalen, ja minimalsten Mengen im Meerwasser enthalten sind oder enthalten sein können. An erster Stelle ist hier die Kieselsäure zu nennen, welche als Skelettsubstanz bei vielen Spongien und Radiolarien eine große Rolle spielt. Nach den Untersuchungen von Bütschli gehört ferner das Strontium hierher, welches als Sulfat das Skelett der Acantharien bildet. Im Spongingerüst von Hornschwämmen und in dem Achsenskelett von Gorgonia Cavolinii kommt nach Drechsel Jod vor, während im Skelett anderer Anthozoen auch reichlich Brom gefunden worden ist (Mörner). In den Nierenkonkrementen von Pinna squamosa fand Krukenberg Mangan auf, welches auch im Blute dieses Tieres vorkommt; im Blut von Cephalopoden und Krebsen kommt bekanntlich Kupfer vor; am allermerkwürdigsten ist aber wohl der Nachweis von Vanadium in dem Chromogen der Blutkörperchen von Ascidien durch Henze. Obgleich diese Stoffe ebenfalls als notwendig für die betreffenden Tiere zu bezeichnen sein dürften, so ist es doch — zum mindesten für die Mehrzahl der aufgeführten Stoffe — am wahrscheinlichsten, daß dieselben nicht etwa wie die anderen unentbehrlichen Stoffe im umgebenden Medium gelöst vorhanden sein müssen, sondern daß sie mit der Nahrung in die Tiere hineingelangen.

7b) Vergleich der Herbstschen mit der Ringer-Lockeschen Lösung. Die von Herbst gefundenen anorganischen Stoffe kommen auch in der Ringer-Lockeschen Lösung vor und zwar, was NaCl, KCl und $CaCl_2$ anbetrifft, auch in ungefähr demselben Verhältnis, worauf J. Loeb aufmerksam gemacht jat. Neuerdings ist diese Aehnlichkeit noch größer geworden, da Tyrode nachgewiesen hat, daß die Ringersche Lösung noch besser wirkt, wenn sie auch einen Zusatz von $MgCl_2$ aufweist. Abgesehen von dem Konzentrationsunterschied unterscheidet sich also die Ringersche Lösung von der Herbstschen nur noch durch das Fehlen der Sulfate in ihr. Da die Ringersche Lösung in dem Gehalt an anorganischen Stoffen auch mit dem Blutserum übereinstimmt, so hat man auch gesagt, die Landtiere trügen noch in ihren Adern verdünntes Seewasser mit sich herum. Das stimmt jedoch nur in bezug auf die relativen Konzentrationen der drei Salze NaCl, KCl und $CaCl_2$, in bezug auf die Magnesiumsalze und Sulfate aber nicht.

7c) Die Vertretbarkeit der notwendigen anorganischen Stoffe durch andere ähnlicher chemischer Natur. Von den Kationen kann nur K bis zu einem gewissen, ziemlich hohen Grade durch Rb oder Cs ersetzt werden. In Lösungen, welche an Stelle von KCl RbCl oder CsCl enthalten, können nämlich Pluteuslarven entstehen,

Digitized by Google

welche sich von normalen nur durch die rudimentäre Beschaffenheit oder das gänzliche Fehlen des Skelettes unterscheiden. Bei schwachen äquimolekularen Dosen wirkt Cs besser als Rb und Rb besser als K, bei höheren Dosen wirkt dagegen K günstiger als die beiden anderen Kationen. Es liegen demnach Optimum und Maximum für Rb und Cs tiefer als für K. Hierzu kommt noch, daß das Optimum für die verschiedenen Prozesse auf verschiedener Höhe liegt, so daß z. B. das Optimum für Skelettbildung bereits überschritten sein kann, wenn es für das Wachstum der Larven und das gesunde Aussehen ihrer Gewebe noch nicht erreicht ist.

Kalzium kann nicht durch Sr oder Ba vertreten werden, und zwar auch nicht, wenn an Stelle der Sulfate Thiosulfate zur Verwendung kommen, so daß genügend Sr- oder Ba-Ionen in den Lösungen vorhanden sind.

In Seewasser, welches an Stelle von Cl Br enthält, können sich Seeigeleier in günstigen Fällen bis zu Pluteuslarven entwickeln, die allerdings etwas dürftig ausgebildet erscheinen. Durch Jod ist Chlor nicht zu ersetzen.

Die Sulfate können in ziemlich hohem Maße durch Thiosulfate ersetzt werden, denn in Seewasser mit Thiosulfaten an Stelle von Sulfaten können Pluteuslarven entstehen, die sich von normalen nur durch unvollständige Skelettbildung, kurze Fortsätze, geringere Größe und spärlichere Pigmentierung unterscheiden. Dithionsaure Salze sind dagegen unbrauchbar, ebenso Selenate und Tellurate.

Herbst, von dem diese Versuche über Vertretbarkeit herrühren, hat beim Studium der Vertretbarkeit der Sulfate auch noch nachgewiesen, daß freie SO_4-Ionen in der Lösung vorhanden sein müssen, da äthylschwefelsaure Salze, die keine SO_4-Ionen abspalten, die Sulfate nicht ersetzen können.

7d) Die Rolle der notwendigen anorganischen Stoffe bei der Entwicklung der Echinodermenlarven nach Herbst's Untersuchungen. α) Leistungen, die allen notwendigen anorganischen Stoffen gemeinsam sind. Fügt man zu einer Mischung, welche irgendeinen notwendigen Aschebestandteil nicht enthält, den fehlenden Stoff in steigenden Dosen zu, so konstatiert man bis zu einer bestimmten Konzentration erstens eine Beschleunigung der Entwickelung und zweitens ein Größerwerden der Larven. Das gilt nicht nur für die notwendigen Kationen, sondern auch für die Anionen. Außerdem ist allen notwendigen anorganischen Stoffen gemeinsam, daß ihre Anwesenheit im umgebenden Medium auch für die Lebenserhaltung ausgebildeter Larvenformen unentbehrlich ist.

β) Unterscheidung von Stoffen, die von Anfang an, und solchen, die erst später, nach dem Blastulastadium, notwendig sind. Von Anfang an müssen in dem Medium vorhanden sein: Na, K, Ca, Cl und eine bestimmte Hydroxylionenkonzentration. Erst später sind dagegen Mg, SO_4 und HCO_3 notwendig.

γ) Spezielle Leistungen einiger notwendiger anorganischer Stoffe während der Entwicklung. Kalium. Die Größe der Larven wird zwar, wie oben angegeben wurde, durch alle notwendigen anorganischen Stoffe beeinflußt, doch kommt dem Kalium beim Wachstum der Larven eine besondere Bedeutung zu, wie z. B. die beiden Figuren 52 A und B, die wir oben betrachtet haben, deutlich zu erkennen geben. Da das Wachstum der Larven auf diesen Stadien durch Wasseraufnahme zustande kommt, so hat also das Kalium irgend etwas damit zu tun. Das trübe Aussehen der Sphaerechinuskeime aus K-freien Mischungen rührt wohl auch von einem zu geringen Wassergehalt der Gewebe her. Die Seeigellarven wimpern im K-freien Medium nicht. Auch die Spermatozoen der Echiniden verlieren darin ihre Beweglichkeit, so daß die Befruchtung der Eier in Seewasser ohne K verhindert wird.

Kalzium. Die wichtigste Rolle, welche Kalzium bei der Entwickelung zu spielen hat, ist die, die Furchungszellen zusammenzuhalten. Im Ca-freien Medium furchen sich die befruchteten Eier zwar, aber es bleiben die Furchungszellen nicht beieinander liegen, wie die beistehenden Figuren 58 A bis C für die Zwei- und D und E für die Vierteilung und ihr Vergleich mit normalen Zwei- und Vierstadien (F und G) zeigen. Bringt man die isolierten Furchungszellen in kalkhaltiges Wasser zurück, so bleiben die Zellen bei den weiteren Teilungen beieinander liegen, und man erhält auf diese Weise aus einem Ei 2, 4, 8 usw. Larven, je nachdem man die Ueberführung in kalkhaltiges Wasser nach der 1., 2., 3. usw. Teilung vornimmt, wie bereits im Kapitel über das Determinationsproblem erwähnt wurde. Aber es gehen nicht nur die Zellen jener Eier auseinander, welche sich von Anfang an in dem Ca-freien Medium befinden, sondern auch die jener Keime, welche sich in gewöhnlichem Seewasser zu entwickeln begonnen haben. Das gilt nicht nur für Furchungsstadien, sondern auch für Blastulae, Gastrulae und Plutei, sowie für die Epithelien ausgebildeter Tiere, während z. B. Muskeln nicht zum Zerfallen in ihre einzelnen Bestandteile durch Ca-freies Wasser zu bringen sind. Figur 54 stellt z. B. den Zerfall einer Echinus-Blastula in Ca-freiem Medium dar. Dieser Zerfall ist ein reversibler Prozeß. Bringt man nämlich

Digitized by Google

einen aufgelockerten Keim mit abgerundeten Zellen aus dem kalkfreien in kalkhaltiges Seewasser zurück, so findet wieder ein Zusammenschluß der abgerundeten Zellen, so weit sie sich noch punktuell berühren, statt, während ganz isolierte Zellen nicht wieder mit in den Verband aufgenommen werden. Schuld an dem Auseinandergehen ist eine Veränderung der hellen Oberflächenschicht der Furchungs- und Larvenstadien, der Verbindungsmembran in der Sprechweise Herbsts, wozu aber noch eine Beeinflussung der Oberflächenspannung der Zellen selbst durch das Fehlen resp. das Vorhandensein des Kalziums kommt. Betont sei übrigens noch, daß das Auseinandergehen von Furchungs- und Gewebezellen nichts mit dem maulbeerartigen Zerfall der Keime beim Absterben infolge schädigender Einwirkungen zu tun hat, denn die Eier furchen sich in dem Ca-freien Medium trotz des Auseinanderweichens der Zellen ruhig weiter, ja differenzieren sich darin zu Wimperzellen, und es treten aus Larven, die man aus normalem in Ca-freies Seewasser bringt, bereits Zellen aus, wenn dieselben noch äußerst munter im Gefäß herumschwimmen.

Magnesium. Obwohl Magnesium seine Hauptrollen erst auf späteren Stadien der Entwickelung zu spielen hat, so ist seine Anwesenheit im umgebenden Medium doch auch für die Befruchtung notwendig, die nach ziemlich kurzem Aufenthalt der Geschlechtsprodukte in Wasser ohne Mg nicht mehr erfolgreich ausgeführt werden kann. Das liegt hauptsächlich an den Eiern, die aber ihre Fähigkeit, befruchtet zu werden, wiedererlangen, wenn der Aufenthalt im Mg-freien Medium nicht zu lange dauerte. Sind die Eier aber schon in befruchtetem Zustand in die Mischung ohne Mg gebracht worden, so stellt sich heraus, daß dann die normale Ausbildung des Darmes und des Skelettes nicht möglich ist. Hierbei spielt also Mg irgendwelche Rollen. Endlich sei betont, daß bei Seesternen (Asterias glacialis) Kalzium allein nicht zum Zusammenhalt der Zellen genügt, sondern daß dazu auch Magnesium notwendig ist.

Das Hydroxylion. Ein richtiger Hydroxylionengehalt des umgebenden Mediums spielt schon bei der Befruchtung eine außerordentliche Rolle. Letztere vollzieht sich nämlich nur innerhalb enger Grenzen der Hydroxylionenkonzentration, die nicht nach oben oder nach unten überschritten werden dürfen. Die enge Beschränkung dieser Grenzen kommt daher, daß das Minimum der OH-Ionenkonzentration für die Eier höher liegt als für die Spermatozoen, und daß bei diesen das Maximum eher erreicht

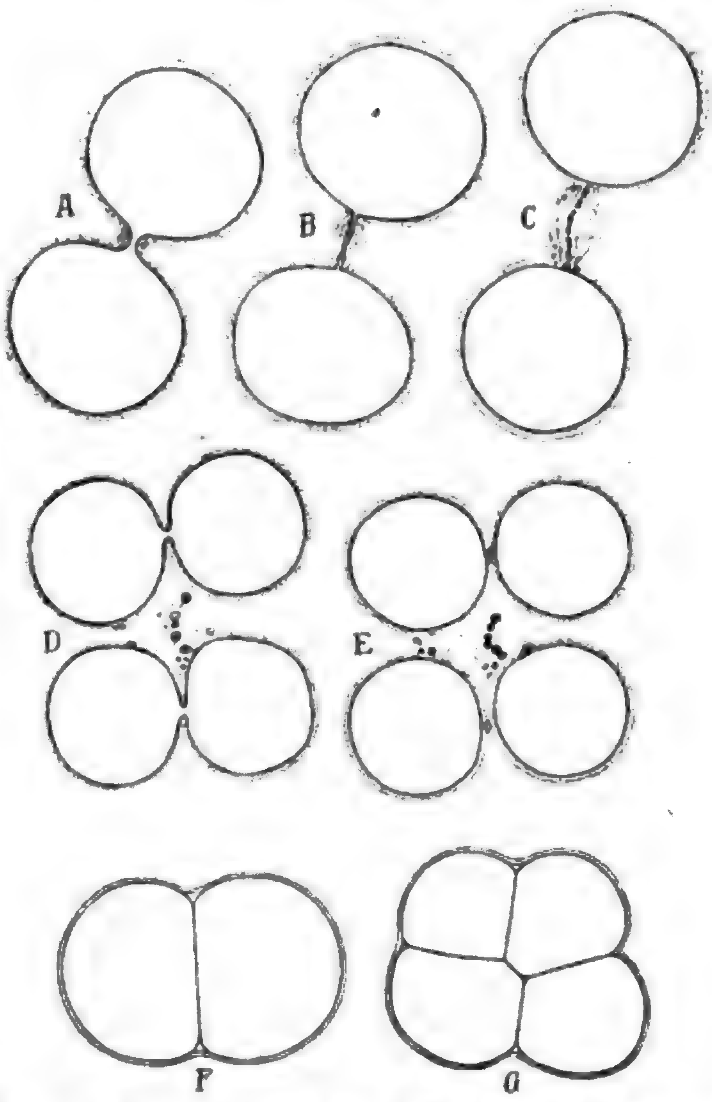


Fig. 58 A bis E. Zwei- und Vierteilung der Eier von Echinus microtuberculatus aus Seewasser ohne Ca. F und G Zwei- und Vierzellenstadium aus einer Kontrollmischung mit Ca-Zusatz. Nach Herbst.

ist als bei den letzteren. Für die Ermöglichung des Eindringens des Spermatozoons ist ein geringerer Konzentrationsgrad erforderlich als für die Abhebung der Dotterhaut. Durch die Hydroxylionen wird die Pigmentbildung begünstigt und das Aussehen der Gewebe der Larven normal hell und glänzend gemacht. Mittels Durchlüftungsversuchen der künstlichen Seewassergemische ohne OH-Zusatz mit kohlensäurehaltiger, aber ammoniakfreier und mit ammoniak- und kohlensäurefreier Luft stellte Herbst fest, daß die Hydroxylionen erstens die Aufgabe haben,

Digitized by Google

die Kohlensäure im umgebenden Medium unschädlich zu machen, daß ihnen aber zweitens noch eine oder mehrere andere Rollen zufallen. Zu den letzteren gehört sicher die bereits von J. Loeb angenommene und von Warburg experimentell bewiesene Beschleunigung der Oxydationsprozesse.

Das SO_4-Ion. Obgleich die Notwendigkeit des SO_4-Ions sich erst nach dem Blastulastadium bemerkbar gemacht, hat dasselbe doch außerordentlich wichtige Aufgaben zu erfüllen. An erster Stelle steht die Beeinflussung des bilateralen und polaren Baues durch das Fehlen dieses Ions. Die Störung der Bilateralität äußert sich erstens in der Lagerung der Skelettbildner. Während nämlich dieselben normalerweise vom Entstehungsort des Urdarmes fortwandern und sich entfernt davon, wie Figur 59 C zeigt, in Form eines Ringes, der zwei symmetrisch gelagerte Zellenanhäufungen aufweist, dicht unter dem Ektoderm anordnen, sieht man sie im SO_4-freien Medium in der Nähe ihres Entstehungsortes (Fig. 59 A) liegen bleiben und hier mit der Skelettbildung beginnen (Fig. 59 B). Bringt man solche Larven, wie eine in Figur 59 A abgebildet ist, aus SO_4-freiem in SO_4-haltiges Seewasser zurück, so wandern die Skelettbildner nachträglich vom Urdarm fort, ordnen sich aber jetzt unter dem Ektoderm

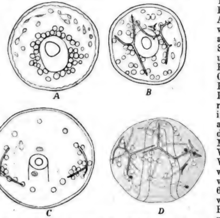


Fig. 59. A Abnorme Lagerung der Skelettbildner in einer Larve aus SO_4-freiem Seewasser vor der Kalknadelbildung und B nach derselben. C Normale Lagerung der Skelettbildner und Dreistrahler aus einer Kontrollmischung mit SO_4-Ionen. D Gastrula mit 7 Dreistrahlern. Larve war nach 2 Tagen aus SO_4-freiem in SO_4-haltiges Seewasser zurückgebracht worden. Alle vier Larven von Sphaerechinus. Nach Herbst.

nicht bilateral, sondern radiär an, so daß nicht 2 symmetrisch gelegene Dreistrahler, wie in Figur 59 C, sondern mehr als 2, bis zu 7, wie in Figur 59 D, entstehen. Auch diese Tatsache zeigt, daß der bilaterale Bau der Larven durch den Aufenthalt in SO_4-freiem Seewasser gestört worden ist. Aber auch der polare Bau kann in SO_4-freiem Wasser gestört werden und zwar dann, wenn mit dem Fehlen der Sulfate zugleich der Ca-Gehalt erhöht worden ist. In Figur 60 A und B sind zwei Larven dargestellt aus einer Ca-reichen, SO_4-freien Mischung und in Figur 60 C eine dritte Larve aus demselben Eimaterial und aus derselben Lösung mit 0,25% $MgSO_4$. Man sieht, daß in dem Wasser ohne SO_4-Ionen der Wimperschopf, welcher normalerweise am animalen Pol der Larve vorhanden ist (Fig. 56 B und 60 C), sich viel mächtiger entwickelt und über einen größeren Bezirk der Larvenoberfläche ausgedehnt hat. Hand in Hand mit der mächtigen Entwicklung des von starren, unbeweglichen Wimpern gebildeten Wimperschopfes geht eine Reduktion des Urdarmes, der in Figur 60 B höchstens noch in der ganz flachen Einsenkung am vegetativen Pole zu erkennen ist. Es ist so die Larve, welche aus einem ganzen Ei entstanden ist, außerordentlich einer Larve ähnlich geworden, wie sie meist aus isolierten animalen Blastomeren des 8-Zellenstadiums entstehen. Durch den SO_4-Mangel hat also das ganze Ei in dem Ca-reichen Wasser den Bau einer animalen Blastomere erhalten, oder, mit anderen Worten, ist dadurch die Plasmabeschaffenheit, welche die Entstehung des Wimperschopfes bedingt, vom animalen Pole aus weiter nach dem vegetativen hin ausgedehnt worden. Das SO_4-Ion spielt weiter bei der Bildung des Darmes eine Rolle, der ohne dasselbe nicht seine vollständige Ausbildung erreicht und außerdem wegen Schädigung der mesenchymatösen Aufhängebänder durch den osmotischen Druck im Blastocöl nach außen gestülpt werden kann. Sodann ist das Vorhandensein von Sulfaten zur normalen Ausbildung des Skelettes notwendig und schließlich zur Pigmentbildung der Seeigellarven, die in Seewasser ohne SO_4-Ionen farblos bleiben.

Die Carbonate resp. Bicarbonate spielen die Hauptrolle bei der Skelettbildung, zu der das Vorhandensein anderer Kalk-

Digitized by Google

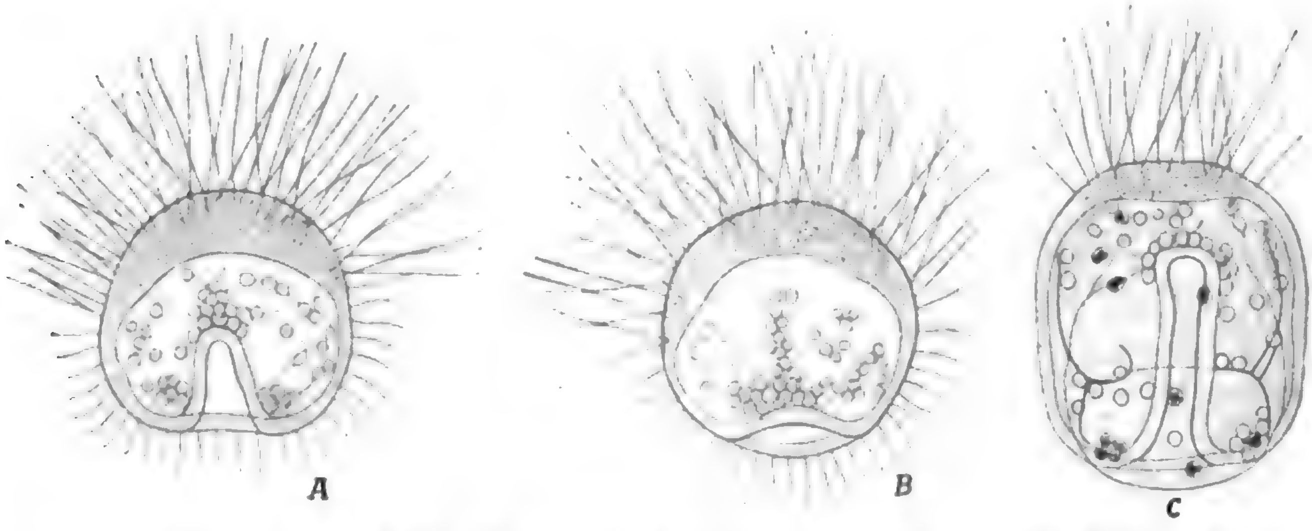


Fig. 60 A und B. Zwei Larven von **Echinus microtuberculatus** mit vergrößertem Wimperschopf aus SO_4-freiem Wasser mit erhöhtem Ca-Gehalt. Zusammensetzung: 3 % NaCl, 0,08 % KCl, 0,64 % $MgCl_2$ (feucht), 0,65 % $CaCl_2$ und 0,05 % $NaHCO_3$. C aus derselben Mischung mit Zusatz von 0,25 % $MgSO_4$. Alle drei Larven gleich alt. Nach **Herbst**.

salze in der Mischung nicht genügt. Das hat auch **Maas** für die Skelettbildung der Kalkschwämme bewiesen.

δ) **Oberflächen- und Innenwirkungen.** Obwohl **Herbst** auf dem Standpunkt stand und noch steht, daß die anorganischen Stoffe in das Innere der Echinodermenlarven hineingelangen, wenn vielleicht auch nicht vom Anfange der Entwickelung an, so hat er doch schon Oberflächen- und Innenwirkungen unterschieden und zu den ersteren den Einfluß des Kalziums auf die Verbindungsmembran und den gewisser Ionen auf die Befruchtungsmöglichkeit der Eier gerechnet. Er hat weiter darauf hingewiesen, daß im Gegensatz zu den Echinodermen bei den Teleostiern die Oberflächenwirkungen der anorganischen Stoffe in den Vordergrund treten, da die Knochenfische des Meeres bekanntlich einen geringeren Salzgehalt in ihrem Blute aufweisen, als der des umgebenden Mediums beträgt, also keine Salze durch ihre Epithelien in ihr Inneres diffundieren lassen. Durch die Untersuchungen von O. **Warburg** ist nun aber die Frage, ob die anorganischen Stoffe bei Echinodermen wirklich ins Innere gelangen, von neuem aufgerollt worden. **Warburg** konnte nämlich einwandfrei nachweisen, daß die OH-Ionen nicht in das Innere der Echinideneier gelangen, sondern nur auf die Oberfläche derselben wirken und so die Oxydationsvorgänge im Innern beschleunigen, da mit Neutralrot gefärbte Eier in Seewasser von einem Hydroxylionengehalt von der Größe 10^{-8}-n stundenlang rot bleiben, während das lipoidlösliche Ammoniak eindringt und in etwa einer Minute den Umschlag von Rot in Gelb bewirkt, obwohl das verwendete Ammoniakseewasser (2 ccm $^1/_{10}$n NH_3 zu 50 Seewasser) eine viel geringere OH-Ionenkonzentration besitzt, als die mit NaOH alkalisch gemachte Salzlösung. Da muß man sich natürlich fragen, ob nicht vielleicht alle zur Entwickelung notwendigen Stoffe nur auf die Oberfläche wirken, ohne in das Innere zu gelangen, denn die notwendigen Stoffe gehören ja zu den lipoidunlöslichen und dürfen deshalb nach **Overtons** Theorie nicht in die Keime eindringen. Trotzdem lassen sich Beweise anführen, daß sie eindringen, wenn vielleicht auch auf einem ganz anderen Wege als dem der Diffusion. Der ausschlaggebende Beweis liegt darin, daß die Echinodermen in ihrer Leibeshöhle Seewasser enthalten. Ferner kann man als Beweis des Eindringens von Salzen die Bildung des Skelettes aus kohlensaurem Kalk anführen, das die Larven, ohne Nahrung aufzunehmen, abscheiden können. Man könnte da zwar einwenden, daß die Eier schon die nötige Quantität Kalk von Haus aus enthalten könnten, aber **Pouchet** und **Chabry** haben in den Ovarien von Seeigeln nur Spuren von Kalk nachweisen können, während in den Larven viel enthalten ist. Da im SO_4-freien Seewasser die Larven pigmentlos bleiben, im Echinochrom **Mac Munns** aber SO_4 vorhanden ist, so ist die nächstliegende Annahme die, daß das letztere aus dem umgebenden Medium stammt. Das wäre ein weiteres Indizium, daß tatsächlich Bestandteile des Meerwassers in das Larveninnere gelangen. Die notwendigen anorganischen Stoffe können demnach bei Tieren, deren inneres Medium im Salzgehalt mit dem äußeren übereinstimmt, sowohl Oberflächen- wie Innenwirkungen hervorrufen.

ε) **Direkte und indirekte Wir-**

Digitized by Google

kungen mit besonderer Berücksichtigung der Loebschen Befunde bei Fundulus. Es ist klar, daß man die Leistungen, welche oben für die einzelnen anorganischen Stoffe aufgezählt wurden, nicht etwa alle für direkte Wirkungen halten darf, da sehr wohl durch einen fehlenden notwendigen Stoff nur ein einziger Prozeß direkt beeinflußt werden kann, während alle anderen Ausfallserscheinungen oder Veränderungen in der Entwickelung von diesem einen direkt beeinflußten Prozeß abhängen, also indirekt durch das Fehlen des betreffenden Stoffes affiziert werden können. So beeinflußt z. B. die Anwesenheit von Hydroxylionen an der Oberfläche der Keime die Oxydationsvorgänge, von denen dann indirekt die Größenzunahme der Larven durch Wasseraufnahme, das hellglänzende Aussehen ihrer Gewebe und die gesteigerte Pigmentbildung abhängen können, während der Einfluß der Hydroxylionen auf die Befruchtungsmöglichkeit der Eier wieder ein direkter sein kann. Es ist zurzeit in den meisten Fällen ganz ausgeschlossen direkte und indirekte Wirkungen der notwendigen anorganischen Stoffe streng auseinanderzuhalten.

Eine ganz besondere Art der indirekten Wirkung der im Meerwasser enthaltenen anorganischen Stoffe hat J. Loeb entdeckt. Er fand nämlich, daß sich die Eier von Fundulus in destilliertem Wasser ebenso wie in Seewasser entwickeln, und daß die jungen Fische auch darin am Leben bleiben, während in einer reinen NaCl-Lösung, die mit Seewasser isotonisch ist, die meisten Eier auf frühen Stadien absterben, und keine Fischchen aus ihnen ausschlüpfen. Nimmt man dagegen an Stelle der reinen NaCl-Lösung ein Gemisch von 96 ccm $^5/_8$-n NaCl + 2 ccm $^5/_8$-n KCl + 2 ccm $^{10}/_8$-n $CaCl_2$, so entwickeln sich nicht nur alle Eier, sondern es schlüpfen die jungen Fischchen auch aus und bleiben unbegrenzt am Leben. Läßt man aus diesem Gemisch das Kalzium fort, so bildet nur ein kleiner Teil der Eier Embryonen, die nicht lange am Leben bleiben. Loeb schließt aus diesen Versuchen, daß eine reine NaCl-Lösung giftig ist, und daß der Zusatz von KCl und $CaCl_2$ nur deswegen notwendig ist, um die Giftigkeit des Kochsalzes aufzuheben. Wenn man diese allgemeine Fassung der Resultate auf Fundulus und andere Teleostier beschränkt, die sich in gleicher Weise wie ersterer ohne Schaden aus Meerwasser in Süßwasser oder umgekehrt übertragen lassen, so ist dagegen gar nichts einzuwenden. Es ist aber entschieden Einspruch zu erheben, wenn man dieselbe Fassung von Formen, die sich so hochgradig unabhängig vom osmotischen Druck und Salzgehalt des umgebenden Mediums erweisen, auf solche überträgt, die sich in ihrem osmotischen Druck und in ihrem Salzgehalt nach dem umgebenden Medium richten, wie dies zum mindesten die meisten wirbellosen Tiere des Meeres tun. Seeigeleier gehen sofort zugrunde, wenn man sie in destilliertes Wasser bringt, und Loeb selbst hat dies auch für Amphipoden des Meeres festgestellt. Loeb hat also ganz entschieden einen Fehler begangen, als er die allgemeine Fassung der Resultate, welche er an einem so absonderlichen Material erhalten hatte, auch auf andere Tiere ausdehnte. Trotzdem gibt Herbst zu, daß auch bei Tieren, die nicht in destilliertem Wasser leben und sich entwickeln können, und für welche die von Herbst aufgefundene Stoffkombination eine notwendige Existenz- und Entwickelungsbedingung bedeutet, darauf zu achten ist, ob ein notwendiger Stoff, der im Laufe der Entwickelung positive Aufgaben zu erfüllen hat, in speziellen Fällen nicht einfach die schädigende Wirkung eines anderen notwendigen Stoffes auf einen bestimmten Prozeß zu beseitigen hat, denn es ist sehr wohl möglich, daß ein unentbehrlicher Aschebestandteil, der bei bestimmten Prozessen positive Aufgaben zu erfüllen hat, bei anderen Prozessen alterierend eingreifen kann, und daß dann die Anwesenheit eines anderen Stoffes notwendig wird, um die schädigende Wirkung des ersteren zu beseitigen. Nach Herbsts Meinung hat demnach Loeb durch seine Versuche nur eine besondere Art indirekter Wirkung der notwendigen anorganischen Stoffe als möglich auch bei solchen Formen nachgewiesen, die in bezug auf osmotischen Druck und Salzgehalt ihres inneren Milieus im Gegensatz zu den Teleostiern vom umgebenden Medium abhängig sind.

Zur Erläuterung der Ansicht von Herbst sei ein Beispiel angeführt, das von diesem selbst herrührt. Weiter vorn wurde bereits erwähnt, daß im SO_4-freien, Ca-reichen Medium der normalerweise am animalen Pole der Blastula und Gastrula vorhandene Wimperschopf mächtiger wird und sich weit nach dem vegetativen Pole zu ausdehnt. Dieser hypertrophischen Entwickelung kann aber gesteuert werden, wenn ein Sulfat zur Mischung zugesetzt wird. Das SO_4-Ion, welches sonst in der Entwickelung positive Aufgaben zu erfüllen hat, wirkt also in diesem Falle dem alterierenden Kalzium entgegen, dem bei anderen Prozessen ebenfalls positive Aufgaben zufallen, wie wir oben sahen. Im übrigen sei noch darauf hingewiesen, daß bei diesem Herbstschen Beispiel ein Anion einem Kation entgegenarbeitet, während in den von Loeb aufgedeckten Fällen Kationen einander antagonistisch gegenüberstehen.

ζ) Das „Wie“ der Wirkung der

Digitized by Google

notwendigen anorganischen Stoffe. Ueber die wichtige Frage, wie nun eigentlich die notwendigen anorganischen Stoffe in letzter Instanz wirken, lassen sich z. Z. nur sehr wenige positive Angaben machen. Sicher ist aber jedenfalls, daß die Frage nicht einheitlich zu beantworten ist. Erstens kommen nämlich chemische Wirkungen in Betracht, wie das z. B. höchstwahrscheinlich bei dem zur Pigmentbildung unentbehrlichen SO_4-Ion der Fall ist, da das Echinochrom SO_4 enthält. Ein mehr passives Verhalten zeigt das Kalziumcarbonat, welches von den Skelettbildnern abgeschieden wird; und schließlich kommt die Wirkung der notwendigen Ionen auf die Kolloide der Eier, Embryonen und ausgebildeten Tiere in Frage. In dieser Hinsicht sind nach der Ansicht vieler Forscher die interessanten Befunde Loebs von großer Bedeutung, die derselbe ebenfalls an den Eiern des merkwürdigen Fundulus heteroclitus machte. Loeb machte nämlich die Entdeckung, daß eine reine NaCl-Lösung für die Fundulus-Eier nicht nur durch den Zusatz von Ca, sondern auch durch den von einem anderen zweiwertigen Metall, wie Mg und Sr, unschädlich gemacht werden kann, ja daß dazu sogar stark giftige Metallionen, wie Ba, Zn, Pb, Co, Ni, Mn verwendet werden können. Nur Hg, Cu und Ag sind zur Entgiftung der Kochsalzlösung unbrauchbar. Die aufgezählten zweiwertigen Kationen sind außerdem imstande nicht nur eine reine Kochsalzlösung, sondern auch Lösungen von anderen einwertigen Kationen (K, NH_4, Li) zu entgiften. Gemeinsam mit Gies stellte dann Loeb weiter fest, daß eine schädliche Lösung eines zweiwertigen Ions, z. B. eine solche von $ZnSO_4$, auch umgekehrt durch NaCl verhältnismäßig harmlos gemacht werden kann; nur ist zur Entgiftung einer schädlichen Zinksulfatlösung eine große Menge Kochsalz notwendig, während im umgekehrten Falle, wo es sich um die Unschädlichmachung einer reinen Kochsalzlösung durch Zn handelt, eine geringe Menge des letzteren genügt. Auch dreiwertige Kationen (Cr, Al) können nach Loeb eine Entgiftung der reinen Kochsalzlösung herbeiführen. Uebrigens handelt es sich bei der Entgiftung einer NaCl-Lösung durch Stoffe wie $ZnSO_4$ nur um ein Wenigerschädlichmachen, da die Embryonen, welche z. B. in einem Gemisch von 100 ccm $\frac{n}{2}$ NaCl + 4 ccm $\frac{n}{64}$ $ZnSO_4$ entstehen, doch weniger lange am Leben bleiben als in einem Gemisch von NaCl und $CaCl_2$. Außerdem können Stoffe wie Zn oder Pb nur so lange die Entgiftung der reinen NaCl-Lösung herbeiführen, als die Embryonen sich noch innerhalb der Eihaut befinden, während die ausgeschlüpften Fische in Kochsalzlösung mit Zinksulfat oder Bleiazetat sogar noch rascher sterben als ohne diese Zusätze. Es handelt sich also bloß um eine Oberflächenwirkung auf die Eihaut, deren Durchlässigkeit, wie Loeb vermutet, wahrscheinlich in einer reinen NaCl- oder $ZnSO_4$-Lösung derartig verändert wird, daß die betreffenden Salze durch die Eihaut hindurchdringen. Durch das antagonistische Salz wird dieses Durchdringen verhindert. Nach Loeb wirken also die beiden Salze, NaCl und $ZnSO_4$, wenn sie beide zugleich vorhanden sind, gemeinsam derartig auf die Eihaut ein, daß dieselbe für beide Salze vollständig oder nahezu undurchdringlich wird. Ob freilich durch die Befunde Loebs die Lehre von der Wirkung der Salze auf Lebewesen den Anschluß an die physikalische Chemie der Kolloide bereits gefunden hat, erscheint deshalb zweifelhaft, weil es sich bei der Wirkung auf die Eimembran des Teleostiereies gar nicht um eine Beeinflussung eines lebenden, sondern eines toten Gebildes handelt. Darüber kann kein Zweifel sein, denn die Eihaut wird nach Ablage des Eies ins Wasser durch Quellung einer Substanz weit von der Eioberfläche abgehoben und hat als Eischale gar nichts mehr mit dem lebenden Keim zu tun.

B. Anregende äußere Faktoren.

In diesem Abschnitt sollen kurz wenige Beispiele solcher äußerer Faktoren besprochen werden, welche zwar zur Entwickelung nicht notwendig sind, welche aber in einer bestimmten Konzentration anregend auf gewisse Bildungsprozesse wirken können.

1. Die günstige Wirkung kleiner, nicht giftiger Phosphordosen auf die Knochenbildung. Sie wurde von G. Wegner an einem Kalbe, das 8 Wochen lang mit P gefüttert wurde, und an erwachsenen Hühnern nach monatelanger Fütterung auf das deutlichste nachgewiesen. Bei den letzteren konnte die Knochenbildung so gesteigert sein, daß die Markhöhlen vollständig schwanden und die Knochen solid wurden. Die chemische Analyse der Phosphorknochen ergab keine wesentlichen Abweichungen vom normalen Verhalten. Kassowitz erweiterte diese Befunde durch den Nachweis, daß die Phosphordosis eine gewisse obere Grenze nicht überschreiten darf, da sonst keine Beförderung des Knochenbildungsprozesses, sondern das Gegenteil erzielt wird.

2. Die Beförderung des Wachstums, besonders desjenigen der Knochen durch Arsenik. Sie ist seit Roussins Versuchen (1863) an jungen Kaninchen bekannt. Viel umfangreichere Untersuchungen stellte später Gies an Hähnen, Kaninchen und jungen Schweinen an und fand die Arsenikwirkung

Digitized by Google

auf das Knochenwachstum ähnlich derjenigen des Phosphors.

3. Beschleunigung der Fortpflanzung von Stylonychia pustulata durch Arsenik nach René Sand. In Arsenwasser von der Konzentration 1 : 1000000 blieben die Tiere zwar am Leben, vermehrten sich aber etwas weniger schnell als in reinem Stärkewasser. In letzterem waren nämlich in 8 Tagen aus einem Tier 55 entstanden, während im Arsenikwasser die Vermehrung erst bis zu 45 Stück geführt hatte. Bei 1 : 5000000 trat in dem Arsenwasser nur etwas stärkere Vermehrung ein als im Stärkewasser ohne As_2O_3, aber bei 1 : 10000000 wurde die Fortpflanzung im ersteren Medium bedeutend lebhafter, so daß aus einem einzigen Exemplar in 8 Tagen 100 Stück hervorgingen gegen 50 in der Kontrollzucht.

4. Beschleunigung der Fortpflanzung von Paramaecium durch Schilddrüsenextrakt. Sie wurde von Nowikoff konstatiert. Lösungen von ½- oder 1-prozentiger gepulverter Schilddrüse in destilliertem Wasser beförderten die Teilungen der Paramaecien bedeutender als Eiweißlösung von 5% oder „Lösungen“ von Hypophysis- oder Nebennierenextrakt.

C. Abändernde äußere Faktoren.

1. Der Zweck der Abänderung des Entwickelungsverlaufs durch abnorme äußere Faktoren. 1a) Die Gesetze der Wirkung der Faktoren können ermittelt werden. Beschränkt man die experimentellen Beeinflussungen der Lebensphänomene nicht nur auf das Aufsuchen der notwendigen Entwickelungs- und Existenzbedingungen, sondern läßt man auch Faktoren auf die Organismen einwirken, denen sie in der Natur nicht ausgesetzt sind, so kann man ermitteln, nach welchen Gesetzen die Faktoren der Außenwelt überhaupt die Organismen beeinflussen. So kann man z. B. feststellen, daß für die Wirkung gewisser chemischer Stoffe das Teilungsverhältnis zwischen Oel und Wasser ausschlaggebend ist, oder daß bei der Einwirkung von Ammoniak und substituierten Ammoniaken auf die Oxydationsprozesse tierischer Zellen bei gleicher Molekularkonzentration die Dissoziationskonstante der betreffenden Basen den Grad der Wirkung bestimmt, wie dies O. Warburg festgestellt hat.

1b) Ermöglichung eines Einblickes in die inneren Ursachen der Gestaltung. Wird durch einen äußeren Faktor ein Gestaltungsprozeß über einen größeren Bezirk als in der Norm ausgedehnt oder an andere Orte verlegt, so kann man hinter die Ursachen der Lokalisation von Bildungsprozessen gelangen. Werden durch einen abnormen äußeren Faktor bestimmte Entwickelungsprozesse gehemmt, so kann man nach Zurückbringen der Keime in normale Bedingungen feststellen, ob durch den Ausfall dieser Prozesse nun auch später auftretende in Wegfall kommen. Die Abhängigkeit eines Bildungsprozesses von einem oder mehreren anderen kann somit aufgefunden werden.

1c) Bedeutung für eine phylogenetische Umwandlung der Formen. Drittens ist klar, daß das Studium der Abänderung der Form durch abnorme äußere Faktoren auch in deszendenztheoretischer Hinsicht von Bedeutung sein kann, wenn man Einwirkungen auswählt, denen die Organismen auch in der Natur ausgesetzt sein können. Natürlich hat sich aber, um den Versuchen die betreffende Bedeutung zu geben, zu dem einfachen Studium der erhaltenen Abänderungen auch das ihrer eventuellen Vererbung hinzuzugesellen, so daß wir hier über die Grenzen dieses Artikels hinausgeführt werden würden, wollten wir näher auf die interessanten Beispiele, die hierher gehören, eingehen.

2. Der Einfluß der Zentrifugalkraft auf die Teilung und Entwickelung tierischer Eier. 2a) Die Versuche am Froschei wurden durch O. Hertwig inauguriert, dem dann später Morgan, Konopacka und McClendon nachfolgten. Das interessanteste Ergebnis ist wohl dieses, daß die Froscheier sich bei einer gewissen Stärke der Zentrifugalkraft nicht mehr total furchen, sondern annähernd nach Art meroblastischer Eier. Es entstehen so Keimblasen, welche auf dem Querschnitt folgendes auffallende Bild liefern (Fig. 61). Man sieht am oberen

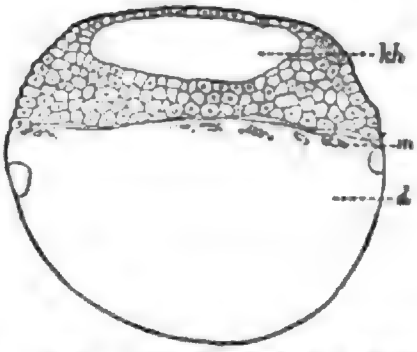


Fig. 61. Unter dem Einfluß der Zentrifugalkraft meroblastisch gefurchtes Froschei. kh Blastocöl, m Dottersyncytium, d unzerklüfteter Nahrungsdotter. Nach O. Hertwig. Aus Korschelt und Heider.

Pol die Keimscheibe mit dem darunterliegenden Blastocöl, dann folgt eine Schicht aus Nahrungs- und Bildungsdotter mit eingestreuten Kernen und schließlich der unzerklüftete Nahrungsdotter. Aus solchen modifizierten Keimblasen können sich auf dem

Digitized by Google

Zentrifugalapparat Gastrulae von abnormer Beschaffenheit und aus diesen nach Entfernung vom Apparat Embryonen entwickeln, welche Defekte oder andere Mißbildungen (Spinabifida) aufweisen.

2b) Versuche am Ei von Ascaris megalocephala. Eine höchst merkwürdige Entdeckung hat Boveri beim Zentrifugieren von Pferdespulwurmeiern gemacht. Er erhielt nämlich unter Umständen dabei Zweizellenstadien, deren beide Zellen den Charakter einer Zelle P_1[1]) hatten. Jede von diesen lieferte in der Folge in typischer Weise die Zellen einer Ventralfamilie, welche parallel zueinander gelagert waren. So entstanden ventrale Halbembryonen, welche aber jede Zellenkategorie doppelt aufwiesen und in ihrer Größe infolgedessen normalen ganzen Embryonen glichen. Diese Züchtung von halben Embryonen aus ganzen Eiern erinnert an die Herbstschen Befunde von der Entstehung animaler langwimperiger Defektlarven aus ganzen Echinideneiern in SO_4-freiem Seewasser mit erhöhtem Kalziumgehalt. Herbst faßt dieses Faktum so auf, daß das ganze Echinus-Ei durch die Einwirkung des abnormen Mediums den Bau einer animalen Eihälfte erhalten hat. Will man diese Betrachtungsweise auf den Boverischen Fall übertragen, so müßte man sagen, daß dem ganzen Ascaris-Ei infolge Zentrifugierens der Bau einer ventralen Eihälfte aufgeprägt worden ist.

3. Der Einfluß abnormer anorganischer Stoffkombinationen. 3a) Einfluß abnormer Stoffkombinationen auf die Kalkabscheidung. α) Versuche an Seeigeleiern. Pouchet und Chabry hatten mittels Natrium- und Kaliumoxalates den Kalk des Meerwassers auszufällen versucht und hatten dabei gefunden, daß nach Ausfällung eines großen Teiles, aber nicht allen Kalkes aus Seeigeleiern halbrunde Larven von innerer Plutensorganisation, aber ohne oder nur mit rudimentären Kalknadeln entstanden. Da diese Larven auch keine Analfortsätze besaßen, so schlossen die beiden Forscher daraus, daß die letzteren mechanisch durch die Kalkstäbe nach außen vorgestülpt werden. Dieselben Resultate wie Pouchet und Chabry nach Ausfällung eines Teiles des Kalkes erhielt darauf Herbst bei normalem Ca-Gehalt durch Zusatz folgender Stoffe: KCl, KBr, KJ, KNO_3, K_2SO_4, RbCl, CsCl, NaJ, $NaNO_3$, $MgSO_4$, ja er bildet sogar einen durch Verwachsung zweier Larven entstandenen Doppelpluteus mit rudimentärem Kalkskelett ab, der aus einer Kultur mit erhöhtem $CaCl_2$-Gehalt stammte. Zuviel Kalk kann also auch, wie übrigens auch Loeb fand, die Kalkabscheidung hemmen. In bezug auf die Entstehung der Pluteusfortsätze ist Herbst anderer Ansicht als die beiden französischen Forscher, wie weiter unten auseinandergesetzt werden wird.

β) Versuche an Hühnern. Es ist interessant, daß Roussin durch Zusatz von KBr oder KJ zum Futter bei Hühnern die Abscheidung der Kalkschale verhindern konnte. Das ist also ein Pendant zu den Versuchen bei Seeigellarven. Roussin erhielt das gleiche Resultat auch mit KF.

3b) Einfluß des Lithiums auf Wachstumsrichtung des Urdarmes und Größe der Entodermbildungszone nach Herbsts Versuchen.

α) Hervorrufung von Exogastrulation durch schwache Lithiumdosen. Schwache Lithiumeinwirkung kann bei Seeigellarven, namentlich bei denen von Sphaerechinus, das Hervorwachsen des Urdarms nach außen, also Exogastrulation, bewirken. Dieselbe ist aber keine spezifische Wirkung des Lithiums, da sie auch mit anderen Mitteln, z. B. durch Wärme (Driesch) hervorgerufen werden kann. Herbst meint, daß durch die Mittel, welche Exogastrulation hervorrufen, die Aufhängebänder, welche den Darm normalerweise im Innern festhalten, geschädigt werden, so daß der Urdarm infolge des osmotischen Druckes im Blastocöl nach außen gestülpt wird.

β) Die Vergrößerung der Entodermbildungszone ist dagegen für Lithium typisch. Die Verbreiterung der Urdarmbildungszone hat eine Verkleinerung des ektodermalen Anteils der Larven, des Gastrulawandabschnittes zur Folge, wie aus der Larvenserie (Figur 62a bis f) zu ersehen ist. Am Ende der Reihe ist in Figur 62e der Gastrulawandabschnitt nur noch als kleines Knöpfchen vorhanden und in f fehlt er sogar ganz, so daß wir hier eine Larve, die nur aus Entoderm und Mesenchym besteht, vor uns haben. Zwischen Gastrulawandabschnitt und Urdarmabschnitt tritt an den pilzförmigen Larven noch ein kleines Verbindungsstück (vst) auf, das aber nur bei den Larven mit nicht zu kleinem Gastrulawandabschnitt zu sehen ist. Durch die Einwirkung des Lithiums wird also ein Bildungsprozeß, der sonst auf den vegetativen Teil des Keimes beschränkt ist, über einen weit größeren Teil der Blastulawand auf Kosten des Ektoderms ausgedehnt. Die Lithiumwirkung bildet somit das Gegenstück zu der Wirkung des erhöhten Kalziumgehaltes in SO_4-freiem Seewasser, denn im letzteren Falle wird, wie wir bereits sahen, eine ektodermale Bildung, der animale Wimperschopf, auf Kosten des Entoderms vergrößert. Lithium und Kalzium greifen

[1]) Was das heißt, ist vorn im deskriptiven Teil des Determinationsproblems in der Schilderung der Mosaikfurchung des Ascaris-Eies zu finden.

Digitized by Google

demnach den Echinidenkeim an verschiedenen Polen an. Trotzdem läßt sich aber die Wirkung des Lithiums durch erhöhten Ca-Gehalt nicht verhindern.

wenn man die Larven nach vorübergehender Li-Wirkung in reines Seewasser überträgt. Aus einer solchen Kultur stammt die in Figur 64 abgebildete Larve, welche auch

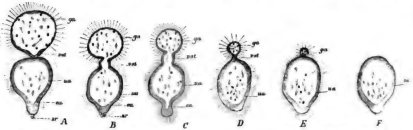


Fig. 62. Serie von Lithiumlarven von Sphaerechinus granularis mit abnehmender Größe des ektodermalen Teiles aus einem Gemisch von 1950 ccm Seewasser + 50 ccm 3,7 prozentiger LiCl-Lösung. ga Gastrulawand-, ua Urdarmabschnitt, vst Verbindungsstück, ea Endausstülpung des Urdarmes, zr Zellenrosette. Nach Herbst.

γ) Das Ineinandergreifen von normaler Gastrulation und Verbreiterung der Entodermbildungszone bei Echinus zeigt deutlich, daß man die typische Lithiumwirkung, d. h. die Verbreiterung der Entodermbildungszone scharf von der Exogastrulation trennen muß, denn bei Echinus kann in Lithiumkulturen der Urdarm nach innen angelegt und trotzdem die Entodermbildungszone verbreitert werden. In Figur 63 ist eine Lithiumlarve aus Seewasser

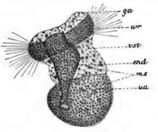


Fig. 63. Lithiumlarven mit langem Innendarm von Echinus microtuberculatus aus einem Gemisch von 96 Teilen Seewasser + 4 Teilen 3,7prozentiger LiBr-Lösung. wr Wimperring, end Innendarm, mz Mesenchymzellen, übrige Bezeichnungen wie in Fig. 62. Nach Herbst.

mit schwachem LiBr-Zusatz abgebildet, welche abgesehen von den typischen drei Teilen einer Lithiumlarve, Gastrulawandabschnitt, Verbindungsstück und Urdarmabschnitt, einen langen Darm im Innern aufweist. Solche Larven, die sogar einen Mund bekommen können, erhält man noch leichter, rudimentäre Kalknadeln aufweist, die in dem Seewasser mit Li-Zusatz nicht gebildet worden wären, da Li auf die Kalkabscheidung hemmend wirkt.

δ) Die Nachwirkung eines vorübergehenden Aufenthaltes in Seewasser mit Li-Zusatz. Blastulae von Sphaerechinus, welche nach Verlassen der Eihülle bei einer Temperatur von 14

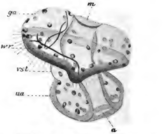


Fig. 64. Lithiumlarve mit langem Innendarm und Mund von Echinus microtuberculatus. Dieselbe hat sich aus einer Larve entwickelt, welche nach vorübergehendem Aufenthalt in Lihaltigem Wasser in gewöhnliches zurückgebracht worden war. m Mund, a After, sonst wie in Fig. 63 und 62. Nach Herbst.

bis 15° C noch 15 bis 20 Stunden in der Lithiumlösung waren, schlagen auch nach Zurückbringen in gewöhnliches Seewasser doch den Lithiumentwickelungsgang ein. Werden die Keime jedoch bereits auf einem späten Furchungsstadium oder gleich nach der Bildung der Blastula in die alten Bedingungen zurückgebracht, so entwickeln sie

Digitized by Google

sich in der Regel normal, wenn auch eventuell etwas langsamer als die Kontrollarven.

ε) Feststellung des Zeitpunktes, von dem an das Lithium auf die Keime einwirken muß, soll die typische Lithiumentwickelung die Folge sein. Nach dem vorstehenden Abschnitt könnte man denken, daß es zur Hervorrufung der typischen Lithiumentwicklung genügt, wenn man erst die Blastulae in die Lithiumlösung bringt. Das ist aber keineswegs der Fall, denn weder ausgeschlüpfte Blastulae, oder solche in der Eihülle noch späte Furchungsstadien werden in Meerwasser mit Lithiumzusatz zu typischen Lithiumlarven. Es ist vielmehr notwendig, die befruchteten Eier ungefurcht oder auf frühen Furchungsstadien aus dem gewöhnlichen Seewasser in solches mit Lithium zu bringen, sollen die Larven den typischen Lithiumentwickelungsgang einschlagen. Die inneren Veränderungen, welche den typischen Lithiumentwickelungsgang zur Folge haben, werden also zwar erst auf dem Blastulastadium durch das Lithium fixiert, müssen aber doch schon auf früheren Stadien vorbereitet worden sein.

ζ) Der Gültigkeitsbereich der vorstehenden Tatsachen ist ein außerordentlich enger, er erstreckt sich nämlich nur auf die Seeigel. Schon bei den Seesternen hat das Lithium nicht dieselbe Wirkung. Trotzdem braucht es aber nicht etwa wirkungslos zu sein, denn Schimkewitsch sah bei Cephalopoden die Statocyste unter dem Einflusse des Lithiums nach außen statt nach innen angelegt werden, und Gurwitsch und Morgan erhielten am Froschei ebenfalls Veränderungen und zwar der letztere solche recht eigentümlicher Art, die aber sehr schwer eine Analyse gestatten.

3c) Der Einfluß von Borsäure auf Froschkeime hat nach Roux's Untersuchungen eine eigentümliche morphologische Abänderung des Entwickelungsganges zur Folge. Die Nasengruben wachsen nämlich nicht in die Tiefe, sondern werden nach außen emporgehoben, so daß die Nase Teleskopform annimmt. In geeigneter Konzentration zerstört die Borsäure unter Abrundung und Absterben der Zellen (Framboisia minor) nur das Epithel der Medullarplatte, doch kann man hier eigentlich nicht mehr von einer Abänderung des Entwickelungsganges durch Chemikalien, sondern nur von einer lokal beschränkten Abtötung von Embryonalteilen sprechen.

3d) Der Einfluß erhöhten $MgCl_2$-Gehaltes des Seewassers auf die Entwickelung der Augen bei Fundulus heteroclitus ist nach den Untersuchungen von Ch. R. Stockard höchst sonderbar: Es entstehen Fischchen, die an Stelle der beiden seitlichen Augen ein einziges median und ventral gelegenes Cyclopenauge aufweisen. In $^1/_2$ m $MgCl_2$-Lösungen in Seewasser sah Stockard in 50% der Fälle Cyclopie auftreten.

4. Der Einfluß der Konzentration des umgebenden Mediums auf die Ausgestaltung von Artemia. Die Untersuchungen von Schmankewitsch über die Umwandlung von Artemia salina durch Verminderung des Salzgehaltes in eine branchipusähnliche Form und durch Erhöhung der Konzentration in Artemia milhausenii sind weit berühmter, als sie ihrer Sicherheit nach verdienen. Was zunächst das erste Resultat anbetrifft, das gewöhnlich so abgefaßt wird, daß es den Anschein hat, es habe Schmankewitsch — was er selbst gar nicht behauptet — ein Genus in ein anderes umgewandelt, so ist schon längst von Claus darauf hingewiesen worden, daß das Vorhandensein von 9 fußlosen Abdominalsegmenten bei Branchipus an Stelle von 8 bei Artemia nicht das hauptsächlichste Unterscheidungsmerkmal, wie Schmankewitsch zu meinen scheint, zwischen den beiden Gattungen ist, und daß außerdem dieses gelegentlich bei Artemia auftretende 9. Segment gar keiner richtigen inneren Segmentierung, sondern nur einer äußeren Ringelung des letzten, 8. Segmentes seinen Ursprung verdankt. Zudem ist diese äußerliche Teilung des 8. Segmentes nicht einmal an eine bestimmte Konzentration gebunden, denn Bateson untersuchte Artemien aus Medien von 1,03074 bis 1,20441 sp. G., konnte aber keine Abhängigkeit der Teilung des 8. Abdominalsegments von der Konzentration des umgebenden Mediums nachweisen. Nach Batesons Untersuchungen, mit denen auch die von M. Samter und R. Heymons übereinstimmen, scheint an den Angaben von Schmankewitsch nur so viel als richtig übrig zu bleiben, „daß in stärker salzigem Wasser durchschnittlich die Körperlänge eine geringere, die Beborstung eine schwächere wird, während umgekehrt in schwächer salzigem Wasser im allgemeinen die Körperlänge etwas zunimmt und die Beborstung eine ausgiebigere wird". Aber „bedingungslos an die Konzentration des Salzwassers geknüpfte Varietäten gibt es bei der Artemia salina nicht" (S. u. H.).

5. Kurzer Hinweis auf die für die Formenumwandlungs- und Vererbungslehre bedeutungsvollen Abänderungen. Schon die im letzten Abschnitt besprochenen Abänderungen haben uns Fragen zugeführt, deren Beantwortung für die experimentelle Abstammungslehre von Bedeutung sind. Tatsachen dieser Art haben sich nun zwar, namentlich in den letzten Jahren, außerordentlich angehäuft, doch gehört ihre Be-

Digitized by Google

sprechung in die Artikel über Abstammungs- und Vererbungslehre (siehe die Artikel „Deszendenzlehre“ und „Vererbung“), so daß hier nur eine kurze Aufzählung der wichtigsten Untersuchungen gegeben werden kann.

Hierher gehören zunächst die Temperaturexperimente mit Schmetterlingen, die bereits im Jahre 1864 von Dorfmeister begonnen und darauf von Weismann, Merrifield, Standfuß, Fischer u. a. fortgesetzt wurden. Gräfin Linden studierte den Einfluß von Sauerstoffentziehung durch eine Kohlensäure- oder Stickstoffatmosphäre auf die Färbung von Vanessa urticae, Pictet fütterte die Raupen von Ocneria dispar mit verschiedener Blätternahrung und erhielt starke Abweichungen in Färbung und Zeichnung. Auch der Einfluß von Feuchtigkeit auf die Färbung der Schmetterlinge wurde von ihm geprüft. Tower beeinflußte den Koloradokäfer (Leptinotarsa decemlineata) und eine nahe verwandte Art durch hohe und niedere Temperatur und verschiedene Feuchtigkeitsgrade und entdeckte die für die Vererbung der Abänderungen wichtige sensible Periode der Keimzellen; Chr. Schröder verdankt man nicht nur Untersuchungen über Abänderung der Färbung und Zeichnung von Schmetterlingen, sondern auch über Instinktvariationen bei Blattkäfern, und endlich studierte Kammerer den Einfluß der Bodenfarbe auf die Färbung von Salamandra maculosa und Bufo vulgaris, den Einfluß erhöhter Temperatur auf die Färbung von Eidechsen und Schlangen und den verschiedener Temperatur- und Feuchtigkeitsgrade auf die Fortpflanzungsverhältnisse von Salamandra maculosa, S. atra und Alytes obstetricans, deren Besprechung natürlich erst recht nicht in diesen morphologischen Aufsatz gehört.

V. Die inneren Faktoren der tierischen Entwickelung.

Die äußeren Faktoren bestimmen, wie wir im vorhergehenden Abschnitt sahen, bei Tieren nur sehr selten Ort und Qualität der Organbildung. Mit Sicherheit ist dies nur bei festsitzenden Tieren nachgewiesen, die sich in dieser Hinsicht an die Pflanzen anschließen, bei denen Ort und Qualität der Organbildung in hohem Maße von äußeren Faktoren abhängig ist. Die äußeren Faktoren sind also bei Tieren nur in wenigen Fällen Determinationsfaktoren, sonst spielen sie bloß die Rolle von Vorbedingungen oder Realisationsfaktoren, um die Sprechweise Roux's zu benutzen, oder von äußeren Mitteln der Formbildung im Sinne von Driesch. Die Faktoren, welche den Ort und die Qualität der Organbildung bestimmen, sind demnach fast durchweg innere, doch ist damit keineswegs gesagt, daß alle inneren Faktoren Determinationsfaktoren sind, denn es kommen unter ihnen auch sehr viele vor, welche man mit Roux als innere Realisationsfaktoren oder mit Driesch als innere Mittel bezeichnen muß.

A. Die in der Eiorganisation gegebenen lokalisierenden Differenzierungsfaktoren.

Die in der Eiorganisation gegebenen Determinationsfaktoren haben wir bereits im Kapitel über das Determinationsproblem und zwar in den beiden Abschnitten B_15 „Die Versöhnung der scheinbar einander widersprechenden Tatsachen“ (S. 573) und B_24 „Plasmaverschiedenheiten als Ursachen von Differenzierungen“ (S. 584), genau diskutiert, so daß wir für eingehendere Orientierung auf diese Abschnitte zurückverweisen können. Es sei deshalb hier nur darauf hingewiesen, daß am Ei für die Lokalisation von Bildungsprozessen erstens die symmetrische Architektur des Eies und zweitens regionale Verschiedenheiten im Eiplasma in Frage kommen. Diese regionalen Verschiedenheiten können sich auch durch deutlich sichtbare, eingelagerte Substanzen zu erkennen geben, doch sind diese sichtbaren Stoffe keine organbildenden, wie die Zentrifugierungsversuche nachgewiesen haben. Es sind also zurzeit nicht sichtbarlich zu demonstrierende Verschiedenheiten im Ooplasma, welche die Orte der Organbildungen, also z. B. an einer Seeigelblastula den Ort der Entstehung des Wimperschopfes oder jenen der Bildung des primären Mesenchyms, bestimmen. Welcher Art diese Verschiedenheiten sind, ob hier chemische oder auch nur physikalische Differenzen vorliegen, das wissen wir nicht, wir wissen durch das Experiment nur, daß solche regionale Verschiedenheiten wirklich da sind. Um das wesentlichste aber hier nicht zu übersehen, sei noch einmal betont, daß bei den Eiern und Keimblättern, solange ihre Teile äquipotentiell sind, das Bestimmtsein des Ortes einer Organbildung durch die Plasmabeschaffenheit nur relativ, d. h. davon abhängig ist, ob andere Ei- resp. Keimblattteile vorhanden sind oder fehlen.

B. Die Bedeutung der Richtungsreize für die Lokalisation von Bildungsprozessen.

1. Das Problem. Die primären Mesenchymzellen der Seeigellarven entstehen am vegetativen Pole der Blastula durch Austritt von Zellen aus dem Epithelverband ins Blastocöl. Sie liegen anfangs in Form eines Haufens dicht beieinander, bewegen

Digitized by Google

sich aber dann von ihrem Entstehungsort fort und ordnen sich rechts und links vom Urdarm dicht unter dem Ektoderm in regelmäßiger Weise an. Warum bewegen sich diese Skelettbildner, denen doch das ganze weite Blastocöl zur Verfügung steht, gerade ans Ektoderm und an ganz bestimmte Stellen desselben? Es kehrt das gleiche Problem natürlich in jeder Ontogenese der Metazoen mit mesenchymatischen Zellen wieder, denn überall kommen Ansammlungen freibeweglicher Zellen an bestimmten Stellen zur Beobachtung. Ein Pendant zu diesem gerichteten Wandern isolierter Zellen bildet das Auswachsen geschlossener Zellenkomplexe oder ihrer Ausläufer nach bestimmten Körperstellen, also z. B. der Verlauf der Gefäße und Nerven. Sofern hier nicht einfach die Konfiguration des Umliegenden maßgebend für die Wachstumsrichtung ist, tritt uns hier ebenfalls das Problem entgegen: Wie finden diese wachsenden Komplexe ihren richtigen Weg? Diese für die kausale Auffassung ontogenetischer Prozesse äußerst wichtige Frage hat, abgesehen von einigen anderen Forschern, die sich, wie His, gelegentlich darüber äußerten, namentlich Herbst in ihrer vollen Bedeutung erkannt. Die Antwort scheint sehr einfach zu sein. Gerade so wie außerhalb des Organismus einzellige und vielzellige freibewegliche Lebewesen durch Reize verschiedener Art in ihrer Bewegungsrichtung bestimmt werden, so können auch im Innern des Organismus Reize, die von bestimmten Körperstellen oder Organen ausgehen, die Richtung wandernder Zellen bestimmen, indem sie letztere entweder anlocken oder abstoßen. Und wie sich eine Keimpflanze mit ihrem Stengel der Lichtquelle zu und mit ihrer Hauptwurzel von ihr abwendet, so kann auch innerhalb eines sich entwickelnden Organismus ein auswachsender Zellenkomplex in seiner Wachstumsrichtung durch Reize bestimmt werden, welche von anderen Organen, Geweben oder Körperteilen auf ihn ausgeübt werden. So naheliegend nun aber auch eine solche Erklärungsweise ist, so ist sie doch bis jetzt erst in recht wenigen Fällen experimentell bestätigt worden.

2. Experimentell in Angriff genommene Fälle. 2a) Das Wandern der primären Mesenchymzellen der Echiniden. Wenn man prüfen will, ob die Bewegung von Zellen innerhalb eines Organismus eine Reaktion auf Richtungsreize ist, so kann man auf zweierlei Weise vorgehen. Man kann nämlich erstens die wandernden Elemente an andere Orte bringen und zusehen, ob sie trotzdem an die richtigen Stellen kriechen, oder man kann die vermutlich anlockenden Bezirke verlagern. Auf das erste Beweisverfahren stützen sich

α) die Versuche von Driesch an Seeigelblastulis, deren primäre Mesenchymzellen durch Schütteln im Blastocöl zerstreut und häufig dem animalen Pole sehr nahe gebracht wurden. Dieselben wanderten aber trotzdem alle oder fast alle an die richtigen Stellen des Ektoderms.

Zu dem zweiten Beweisverfahren kann man dagegen

β) die Resultate Herbsts an Lithiumlarven, besonders an denen von Echinus microtuberculatus, benutzen. Wir sahen, daß bei diesem Seeigel, namentlich wenn man die Larven nach dem Blastulastadium aus der Li-Lösung in normales Seewasser zurückbringt, normale Gastrulation und Lithiumentwickelung ineinandergreifen, d. h. daß ein Archenteron nach innen angelegt, gleichzeitig aber die Entodermbildungszone weiter nach dem animalen Pole zu verschoben wird. Dadurch werden natürlich auch die ektodermalen Bezirke animalwärts verlagert, und wenn dieselben wirklich anlockend auf die Skelettbildner wirken, so dürften sich letztere nicht im vegetativen Teil der Larve anordnen, sondern sie müssen entgegen ihrem gewöhnlichen Verhalten unter dem animalen Dache der Larve sich ansammeln; und das ist in der Tat der Fall. Welcher Art nun freilich die von dem Ektoderm ausgehenden Wirkungen auf die primären Mesenchymzellen sind, das ist zurzeit noch völlig dunkel.

2b) Die Richtungsbewegungen der Pigmentzellen im Fundulusembryo nach J. Loeb. Die Pigmentzellen des Dottersackes der Fundulusembryonen liegen zunächst unregelmäßig zwischen den Kapillaren des Dottersackes. Einige Tage darauf sind aber die Pigmentzellen auf die Kapillaren gekrochen und haben sich denselben dicht angeschmiegt. Loeb meint, daß bei diesem gerichteten Wandern positive Chemotaxis, bei welcher der Sauerstoff des Blutes als Reizmittel wirkt, und positive Thigmotaxis beteiligt sind, doch ist sein Beweisverfahren nicht ganz zwingend.

2c) Richtungsreize bei der Bildung der Choroidea. „Ein ausgezeichnetes Beispiel für die Beteiligung von Richtungsreizen an der Bildung bindegewebiger Hüllen um Organe bietet . . . die Entwickelung der Choroidea des Auges; hier kann man an Mißbildungen direkt nachweisen, daß die Pigmentschicht des Augenbechers das Auflagern von Bindegewebszellen auf die äußere Wand beeinflußt. Wird nämlich im Verlaufe der Ontogenese die ventrale Augenspalte, durch welche der Glaskörper in die Augenblase hineingewachsen ist, nicht wie gewöhnlich durch Verwachsung der Ränder geschlossen, so fehlt an dieser Stelle die Aderhaut des Auges. Durch unsere

Digitized by Google

Hypothese, nach der die Mesenchymzellen durch einen spezifischen Reiz von seiten der äußeren Wand des Augenbechers zu einer festen Auflagerung auf ihr veranlaßt werden, ist die Entstehung dieser „Coloboma" genannten Mißbildung leicht erklärlich" (Herbst 1894). Handelt es sich in diesem Falle um ein Naturexperiment, welches die anlockende Wirkung der äußeren Schicht des primären Augenbechers auf Mesenchymzellen beweist, so haben wir im folgenden ein wirkliches Forscherexperiment vor uns.

2d) Die Bildung einer Knorpelkapsel um die Gehörblase bei Amphibien kommt nämlich nach den Untersuchungen von Lewis ebenfalls dadurch zustande, daß Mesenchymzellen von der Gehörblase angelockt werden. Lewis übertrug die Anlage des Gehörorgans von Rana sylvatica in einen Amblystomaembryo und konstatierte, daß sich nach einiger Zeit um die transplantierte Hörblase, die zwischen dem Auge und der normalen Amblystomahörblase lag, eine Knorpelkapsel gebildet hatte. Wie sich an dem Aussehen der Knorpelzellen konstatieren ließ, war dieselbe von Amblystomazellen gebildet worden. Im Froschembryo bildet sich aber an der Stelle, wo die exstirpierte Gehörblase liegen sollte, keine Knorpelkapsel aus, wenn die Blase nicht regeneriert wird. In einem Falle hatte sich aus einem stehengebliebenen Rest der Gehörblasenanlage ein kleines Gehörbläschen entwickelt, und dieses wies auch eine kleine Knorpelkapsel auf.

2e) Der Cytotropismus Roux's und das Zusammenfinden homologer Zellen in Furchungsstadien von Ascaris megalocephala. Roux sah isolierte Zellen der Morula und der Blastula von Rana fusca sich einander nähern, wenn der Abstand zwischen ihnen gleich dem halben oder höchstens gleich dem ganzen Zellendurchmesser war. Er führte diese Näherungserscheinungen hypothetischerweise auf Chemotaxis zurück, doch dürften hier einfache kapillare Attraktionsphänomene vorliegen. Ebenso liegt kein Grund vor, die von zur Strassen und Boveri bei Ascaris megalocephala beobachteten merkwürdigen Gleiterscheinungen, die zusammengehörige Zellen trotz oft weiter anfänglicher Entfernung zusammenführen können, durch Richtungsreize herbeigeführt zu denken, sondern es hat hier der Entdecker des Cytotropismus völlig recht, wenn er zur Strassen vorwirft, er habe die Möglichkeit übersehen, daß diese Gleiterscheinungen alle durch Oberflächenspannungen bewirkt werden können, „sofern die Oberflächenspannungen der einzelnen Zellen resp. einzelner Stellen der Zellen entsprechend ‚verschiedene' sind, und wenn diese Spannungen selber zeitlich wechseln". Wenn diese örtliche und zeitliche Verschiedenheit der Oberflächenspannung typisch geregelt ist, dann muß auch ihr Effekt typisch sein.

2f) Die Ueberbrückung von Nervenlücken nach Forssmans Untersuchungen und das Wegfinden der auswachsenden Nervenfasern. Schon Joest hatte bei Pfropfversuchen an Regenwürmern Tatsachen aufgefunden, welche die Annahme wahrscheinlich machten, daß bei der Ueberbrückung von Nervenlücken Richtungsreize eine Rolle spielen. Forssman hat dann später diese Annahme durch Experimente bestätigt. Er brachte einmal die beiden Nervenstümpfe in abnorme Lage zueinander, indem er sie in Strohhalmstücke oder Kollodiumröhren einführte, und sah sie sich trotzdem zusammenfinden; und sodann befestigte er am zentralen Ende eines durchschnittenen Nerven zwei Röhrchen aus Kollodium, von denen das eine mit zerriebener Leber oder Milz, das andere mit zerriebenem Gehirn gefüllt war. Die auswachsenden Nervenfasern wuchsen alle in das mit Gehirn gefüllte Röhrchen hinein, woraus Forssman den Schluß zieht, daß es die zerfallende Nervensubstanz ist, welche die auswachsenden Nervenfasern anlockt. So läge also beim Ueberbrücken von Nervenlücken eine besondere Art von Chemotaxis vor. Forssman gebraucht dafür den Namen Neurotropismus. Es ist natürlich klar, daß diese Art von Reizbarkeit uns zum Verständnis des Wegfindens der Nerven während der Embryonalentwickelung gar nichts nützt. Das Sichere, das man bis jetzt über diese Frage weiß, ist folgendes:

Erstens spielt beim Wegfinden der Nerven die Konfiguration des Ganzen eine Rolle. Das ist bewiesen durch die Experimente von Braus und Harrison, welche Gliedmaßenanlagen von Anuren in andere Umgebung brachten und dadurch das Einwachsen anderer als der normalen Nerven in diese transplantierten Extremitäten erzielten. Zweitens ist bewiesen, daß den einzelnen Nerven nicht etwa eine typische Bahn und eine typische Verzweigungsform von Haus aus eingepflanzt ist, denn werden z. B. Anlagen von Vordergliedmaßen der Unke auf den Kopf gepflanzt, so kann, wie Braus fand, der Facialis oder Trigeminus Aeste in diese Arme schicken und den für eine Vorderextremität typischen Nervenverlauf in ihnen erzeugen! Das, was den Nerven die Bahn weist, liegt also außerhalb der Nerven, und alle Nerven verhalten sich diesen Faktoren gegenüber gleich. Drittens ist bewiesen, daß die Nervenfasern thigmotaktische Reizbarkeit besitzen. Hier ist zunächst an das alte Experiment von

Digitized by Google

v. Notthafft zu erinnern, der zur Ueberbrückung einer Nervenlücke Seidenfäden benutzte, an denen die auswachsenden Nervenfasern entlang wuchsen. Sodann kam neuerdings Harrison beim Studium seiner berühmten Deckglaskulturen isolierter Nervenzellen zu dem Schlusse, daß das Vorhandensein von soliden Stützen im umgebenden Medium höchstwahrscheinlich eine notwendige Bedingung für das Auswachsen der Nervenfasern sei, und teilt Braus mit, daß sich die feinen Ausläufer der Ramónschen Wachstumskeulen längs der Fäden geronnenen Fibrins in den Deckglaskulturen ausbreiten. Diese bisher ermittelten Tatsachen und die vielleicht vorkommende passive Verschiebung auswachsender Nervenfasern durch andere Organanlagen sind aber nicht imstande, den typischen Verlauf und die typische Verzweigung der Nervenstämme vollständig zu erklären. Es müssen also zurzeit hier noch die beiden Hypothesen aushelfen, von denen die eine von Ramón y Cajal und unabhängig von diesem von Herbst, die zweite neuerdings von Braus ausgesprochen worden ist. Nach Ramón und Herbst sollen Richtungsreize den auswachsenden Nervenfasern den Weg weisen, während die letzteren nach Braus Bahnen folgen sollen, welche durch Plasmodesmen vorgebildet sind. Daß diese letztere Auffassung aber nur eine Verschiebung des Problems bedeutet, liegt auf der Hand.

C. Gestaltliche Beeinflussung der Organe und Organteile untereinander.

1. Terminologisches. Wenn wir in unserer Terminologie der Mehrzahl der modernen Biologen folgen wollten, so hätten wir diesen Abschnitt auch Correlationserscheinungen überschreiben können, denn es wird jetzt unter dem Worte Correlation[1]) meist ein kausales Abhängigkeitsverhältnis zwischen Teilen eines Organismus untereinander verstanden. Durch die historischen Untersuchungen von Rádl hat sich aber herausgestellt, daß der Begründer des Correlationsbegriffes, George Cuvier, unter einer Korrelation gar kein Kausalverhältnis verstand. Er verstand darunter vielmehr das empirisch erkannte, notwendige Beieinandersein von Eigenschaften. So sind z. B. der Besitz eines kompliziert gebauten und aus 3 oder 4 Teilen bestehenden Magens, sowie die Fähigkeit des Wiederkäuens mit einem gespaltenen Huf und mit verwachsenen Mittelfußknochen verbunden. Findet man eine solche Extremität, so kann man infolgedessen aus diesen ihren Eigenschaften eine ganze Reihe anderer Eigenschaften ableiten, welche die betreffende Tierform, der die Extremität angehörte, besessen haben muß. Es wäre natürlich vollständig verkehrt, von einer kausalen Abhängigkeit der verschiedenen Eigenschaften voneinander oder von den verwachsenen Mittelfußknochen zu sprechen, ihr Zusammenvorkommen ist vielmehr kausal durch die Beschaffenheit des Ausgangsmaterials, also dadurch begründet, daß letzteres ein Wiederkäuerei war.

Für die gestaltlichen Beeinflussungen von Organismenteilen untereinander wird auch vielfach der Rouxsche Ausdruck „abhängige Differenzierung" gebraucht. Roux nennt so jene „Veränderungen eines umgrenzten Gebildes oder Teiles, deren determinierende Ursachen teilweise oder ganz außerhalb desselben liegen"; aber dieser Begriff ist viel weiter, als daß er nur die Tatsachen umfaßte, die im folgenden zur Sprache kommen sollen, denn Roux bezeichnet z. B. auch die von ihm beschriebenen Postgenerationsvorgänge als abhängige Differenzierungen, und außerdem braucht nach vorstehender Definition der die abhängige Differenzierung herbeiführende Faktor nicht an einer anderen Stelle im Innern des Organismus zu liegen, sondern er kann auch aus der Außenwelt stammen. In diesen Abschnitt würden also nur alle jene abhängigen Differenzierungen gehören, wo die sie bestimmenden Faktoren von anderen Teilen desselben Organismus ausgehen.

Der Rouxsche Begriff der abhängigen Differenzierung ist wegen Einbeziehung der Postgenerationsprozesse, bei denen bruchstückweise Angelegtes durch Angliederung neuen Materials an bereits Vorhandenes zur Norm ergänzt wird, nicht etwa mit dem Begriff der formativen Reizwirkung identisch. Als formativer Reiz wird nämlich von Herbst eine jede Auslösungsursache bezeichnet, welche einen qualitativ neuen Gestaltungsprozeß ins Leben ruft. Solche Auslösungsursachen können natürlich auch entweder aus der Außenwelt oder von einem anderen Teil desselben Organismus stammen. Die inneren formativen Reizwirkungen würden also in diesen Abschnitt aufzunehmen sein.

2. Formative Reize, welche den Ort der Organanlage bestimmen. **2a)** Die Entstehung der Pluteusarme wird nach Herbst durch den Druck ausgelöst, welchen die sich vergrößernden und vorwärtsschiebenden Armstützen auf die betreffenden Stellen der Wimperringgegend der Seeigellarven ausüben. Fallen die Armstützen fort, so bleibt die Entwickelung der Fortsätze aus, werden gleich von Anfang an die Stützen für mehr als 2 Analarme, die bei Sphaer-

[1]) Eingehenderes über Correlation ist in dem Artikel „Correlation" zu finden.

Digitized by Google

echinus dreikantig und gegittert sind (Fig. 57), angelegt, so entstehen so viele Analarme, als Analarmstützen vorhanden sind. Der Druckreiz der wachsenden Kalkstützen muß kontinuierlich wirken, denn bleiben die Kalkstützen klein, so bleibt es auch der häutige Teil der Arme. Eine rein mechanische Ausstülpung kann deshalb nicht vorliegen, weil einmal die Haut von den Kalknadeln einfach durchstochen werden müßte, und weil zweitens die Zellen der Wimperschnur an den Fortsätzen nicht etwa weit auseinander gezogen werden, sondern auch noch nach der Fortsatzbildung dicht gedrängt liegen. Da der Satz gilt: „So viele Armstützen an die Wimperringgegend antreffen, so viele Pluteusfortsätze werden gebildet", so ist klar, daß es sich hier um die Bestimmung des Ortes der betreffenden Organbildung handelt, deren Qualität durch die Reaktionsfähigkeit der Wimperringgegend bestimmt wird.

2b) Auslösung der Deciduabildung durch mechanische Reize. Leo Loeb konnte durch umfangreiche Experimente an Meerschweinchen nachweisen, daß das Ei bei der Bildung der Decidua keinen spezifischen Reiz auf die Uterusschleimhaut ausübt, sondern daß derselbe durch Einschnitte in den Uterus oder auch durch Fremdkörper, wie Glaskapillaren, Paraffinstücke oder dünnen Platindraht ersetzt werden kann. Damit der mechanische Reiz aber wirklich eine Reaktion hervorrufen kann, ist ein Stoff notwendig, der nach Leo Loeb von dem Corpus luteum geliefert wird. Derselbe macht erst die Uterusschleimhaut zur Reaktion fähig, er wirkt, wie sich Loeb ausdrückt, sensibilisierend. Bei dem Meerschweinchen kann nur die Uterusschleimhaut durch diesen Stoff sensibilisiert werden. Tuben- und Bauchschwangerschaften, die gelegentlich beim Menschen vorkommen, werden nämlich bei diesen Tieren nicht beobachtet. Das Experiment der Erzeugung von Deciduen durch mechanische Reize ohne Beteiligung des Eies, das durch Zubinden der Tuben am Eintritt in den Uterus verhindert wird, gelingt aber nur, wenn der mechanische Reiz 2 bis 9 Tage nach der Kopulation angewendet wird.

3. Formative Reize, welche die Qualität der Organanlage bestimmen. 3a) Beeinflussung der Qualität der Organbildung durch Wirkungen unbekannter Art. Bei den meisten dekapoden Krebsen liegen die Zentralorgane der Photorezeption entfernt vom Gehirn im Augenstiel. Herbst fand nun folgendes: Wird von einem Stielauge, z. B. von Palaemon, das eigentliche Auge entfernt, der Stiel mit den darin befindlichen Augenganglien aber geschont, so entsteht auf dem Stumpf ein neues Auge. Werden aber zugleich mit dem Auge auch die Augenganglien entfernt, sei es, daß dieselben aus dem Stielstumpf herausgenommen werden, sei es, daß der Schnitt weiter basalwärts am Stielauge geführt wird, und dadurch die Ausschaltung der Ganglien zugleich miterfolgt, so wird an Stelle des Auges eine Antennula regeneriert. Die An- oder Abwesenheit der Augenganglien entscheidet also hier über die Qualität des Regenerates, während der Ort natürlich einfach von Anfang an gegeben ist.

3b) Beeinflussung der Organbildung durch Hormone. Man versteht unter Hormonen Stoffe, welche von Organen in die Blutbahn abgeschieden werden und welche auf die Ausbildung oder die Funktion anderer einen Einfluß ausüben. Für uns kommt natürlich hier nur die erste Sorte von Hormonen in Betracht, und auch von diesen sollen nur zwei Beispiele besprochen werden, da erstens Näheres darüber in dem Artikel über „Innere Sekretion" zu finden ist, und da außerdem die Wirkungen mancher solcher Hormone, wie z. B. derjenigen der Schilddrüse und der Hypophyse, wohl eher als quantitative denn als qualitative zu bezeichnen sind. Selbstredend sind auch solche bestimmte Gestaltungsprozesse fördernde Wirkungen für den Aufbau des Organismus während der Ontogenese von großer Wichtigkeit, aber immerhin doch von geringerer als jene Wirkungen, welche in der Hervorrufung neuer Differenzierungsvorgänge bestehen. Natürlich können formativ wirkende Stoffe, welche mit dem Blute zirkulieren, nicht lokalisierend wirken, sondern höchstens die Qualität der Organbildung beeinflussen, deren Oertlichkeit aber von einem anderen Faktor bestimmt werden muß. Dieser ortsbestimmende Faktor scheint zugleich auch die erste Anlage der betreffenden Organe hervorzurufen, so daß die Hormone nur für die weitere Ausdifferenzierung derselben verantwortlich gemacht werden könnten.

α) Die Beeinflussung des Wachstums der Milchdrüsen durch Hormone, welche von den sich entwickelnden Embryonen an das Blut abgegeben werden, wurde zuerst von Starling in Verbindung mit Miss Lane Claypon experimentell nachgewiesen. Durch Injektion von Extrakt, den sie aus Embryonen gewannen, konnten sie auch an nicht trächtigen Kaninchen eine Vergrößerung der Milchdrüsen herbeiführen. Später wurde dann von Basch gefunden, daß auch das innere Sekret der Ovarien einer trächtigen Hündin, welche in ein jungfräuliches Tier implantiert worden waren, in Verbindung mit Injektionen von Placentarextrakt das Wachstum der Milchdrüsen

Digitized by Google

der jungfräulichen Hündin so in Gang brachte, daß die Drüsen funktionsfähig wurden. Da die Milchdrüsen auch schon vor der Einwirkung dieser Hormone vorhanden sind, so wird durch diese Stoffe also nur ihre weitere Ausbildung in Gang gebracht, und es fragt sich deshalb, ob man überhaupt einen solchen Einfluß als einen qualitativen bezeichnen darf. Die Veränderungen, welche eine jungfräuliche Milchdrüse während der Trächtigkeit erfährt, scheinen bei näherem Zusehen aber doch die Bezeichnung qualitativ zu verdienen, denn Vorhandenes wächst dabei nicht nur heran, sondern es verändert sich auch in seinen Eigenschaften.

β) Die Beeinflussung der sekundären Sexualcharaktere durch die Keimdrüsen[1]) ist seit der kritischen Sichtung des vorhandenen Materials durch Herbst im Jahre 1901 durch verschiedene Forscher in außerordentlich eingehender Weise studiert worden. Die wesentlichsten Resultate dieser Untersuchungen sind folgende: Erstens hat sich herausgestellt, daß man von einem Fall nicht auf den anderen schließen darf. Wenn Abhängigkeit oder teilweise Abhängigkeit in dem einen Fall existiert, so braucht das in einem anderen nicht auch so zu sein. Die Unabhängigkeit der primären und sekundären Sexualcharaktere von den zugehörigen Keimdrüsen bei Schmetterlingen ist in der einwandfreiesten Weise nach den Resultaten von Oudemans und Kellogg neuerdings von Meisenheimer und Kopeć bewiesen worden. Dagegen ist beim Menschen, bei Cerviden, bei Ratten, bei Hühnern, bei Anuren und Urodelen und bei Krabben ein mehr oder weniger deutlicher Einfluß der Keimdrüsen auf die Ausbildung der sekundären Sexualcharaktere festgestellt. Es muß aber besonders betont werden, daß die sekundären Sexualcharaktere sich auch mehr oder weniger weit ohne das Vorhandensein der dazu gehörigen Keimdrüse zu entwickeln beginnen können, daß sie aber ihre vollständige normale Ausbildung nur mit Hilfe der letzteren erreichen. Das ist der zweite Punkt von Wichtigkeit, auf den bereits Herbst 1901 aufmerksam gemacht hat. Drittens ist zu beachten, daß die Kastrationsversuche sehr verschieden ausfallen können, je nachdem sie im jugendlichen Alter oder später ausgeführt werden. Das beweisen die Ergebnisse der Kastration beim Manne. Viertens ist in einigen Fällen festgestellt worden, daß die Keimdrüsen auch einen hemmenden Einfluß auf die Entwickelung der Charaktere des entgegengesetzten Geschlechtes ausüben, worauf Herbst ebenfalls im Anschluß an vorhandene Tatsachen hingewiesen hatte. Nach Rörig können nämlich Ricken, die erkrankte Sexualorgane besaßen oder steril geworden waren, Geweihe aufsetzen, die aber nicht die normale Ausbildung wie bei einem Bock erreichen und auch beständig mit Bast bekleidet bleiben. Solche Angaben zwingen uns einfach zu dem Schluß, daß die normale Beschaffenheit der Ovarien die Entstehung von Geweihen hemmt, denn es ist ja sonst gar nicht einzusehen, warum die betreffenden steril gewordenen Weibchen nicht schon früher Geweihe aufgesetzt hatten. Ein Pendant dazu liefert die Hahnenfedrigkeit (Arrhenoidie) weiblicher Vögel, wenigstens in jenen Fällen, wo dieselbe die Folge von Alterssterilität ist. Von Korschelt und Poll wurden z. B. zwei Fälle von Erpelfedrigkeit bei sterilen resp. steril gewordenen Enten genau untersucht. Kastrierte männliche Enten bekommen aber nicht das weibliche Federkleid, wie Poll zeigte. Die Umwandlung der sekundären Sexualcharaktere geht also hier nur in einer Richtung, in der vom Weibchen zum Männchen. Bei der „Castration parasitaire" (Giard) ist die Richtung der Umwandlung nach Smith gerade die umgekehrte. Die Kastration durch Sacculina hat beim Weibchen von Inachus scorpio nämlich zwar ein Rudimentärwerden der Abdominalanhänge zur Folge, aber nicht das Auftreten von männlichen Charakteren. Dagegen nimmt das Männchen weibliche Merkmale an. Und es ist ganz merkwürdig, daß solche Männchen mit äußerlich hermaphroditischem Charakter, wenn sie sich nach Absterben oder künstlicher Entfernung der Sacculina erholen, eine Geschlechtsdrüse regenerieren können, die sowohl Hoden- wie Eiröhren aufweist! Fünftens kann man auch die nahe liegende Annahme, daß die sekundären Sexualcharaktere durch innere Sekrete der Keimdrüsen beeinflußt werden, in einigen Fällen als bewiesen ansehen; das gilt nach den Untersuchungen von Nußbaum, Steinach, Meisenheimer und Harms z. B. für die Frösche, und zwar wirken da die Hormone nach den Experimenten des letzteren Forschers nicht mit, sondern ohne Vermittlung des Nervensystems auf die Daumenschwielen ein. Durch die experimentellen und histologischen Untersuchungen von Bouin und Ancel, Tandler und Grosz und Steinach ist wenigstens für eine Reihe von Säugetieren weiter bewiesen, daß zur Ausbildung der männlichen Sexualcharaktere das Vorhandensein des interstitiellen Gewebes der Hoden allein genügt, wenn man auch noch nicht sagen darf, daß nur letzteres die Hormone zu liefern vermag, welche die Sexualcharaktere

[1]) Vgl. die Artikel über „Geschlechtsbestimmung" und „Innere Sekretion".

Digitized by Google

beeinflussen, da wie Kammerer richtig bemerkt, noch das entgegengesetzte Experiment fehlt: Ausschaltung des interstitiellen und Erhaltung des generativen Gewebes. Für die Ovarien dürfte Aehnliches gelten. Was endlich die Frage anbelangt, ob die von den Keimdrüsen gebildeten Hormone spezifisch sind oder ob sie dies nicht sind und ob sie einfach dadurch wirken, daß sie die Lebenstätigkeiten im Organismus überhaupt anregen, so wird die Entscheidung vielleicht dahin fallen, daß sowohl das eine wie das andere der Fall ist, d. h. daß die Eigenschaft, die Lebenstätigkeiten anzuregen, beiderlei Hormonen zukommt, daß aber außerdem dem Hodensekret und dem Ovarialsekret auch noch spezifische Wirkungen auf die Geschlechtscharaktere eigen sind. Dies würde manches erklären, was bei einseitiger Vertretung des einen Standpunktes, z. B. des zweiten, unerklärlich bliebe. So gibt es z. B. Fälle, die einen zu der Ansicht führen können, daß zur Ausbildung gewisser sekundärer Sexualcharaktere die Anwesenheit irgendeiner Keimdrüse, gleichgültig welcher, notwendig sei; daß aber in solchen Fällen die Ovarialsubstanz doch nicht dasselbe leistet wie die Hodensubstanz, ist auch sicher. Und es handelt sich bei diesem Unterschied nicht nur um einen quantitativen, denn die Veränderungen, welche bei Vorhandensein der zugehörigen Keimdrüse zu konstatieren sind, sind nicht einfach dimensionale Vergrößerungen, sondern weitere Entwickelungsstadien, die auch durch ihre formale Beschaffenheit, nicht nur durch ihre Größe von den anderen verschieden sind. Deswegen kann man die Wirkung der Keimdrüsen auf die zugehörigen Sexualcharaktere immer noch als formativ bezeichnen, obwohl sich die letzteren bis zu einem gewissen Grade auch unabhängig von den ersteren zu entwickeln vermögen.

4. Formative Reize, welche Ort und Qualität der Organanlage bestimmen. 4a) Die Bildung der Linse des Wirbeltierauges. In seiner Abhandlung „Formative Reize in der tierischen Ontogenese" erörterte Herbst an der Hand der zeitlichen Aufeinanderfolge der einzelnen Bildungsprozesse bei der Augenentwickelung und der als Triocephalie, Anophthalmie und Cyclopie bekannten Mißbildungen des Auges die beiden Alternativen der abhängigen und unabhängigen Entstehung der Linse von der Berührung durch die Augenblase und hielt schließlich trotz kritischer Erörterung verschiedener Möglichkeiten der Entstehung dieser Mißbildungen die erstere der beiden Ansichten für die richtige. Nachdem nun aber Stockard in neuerer Zeit gezeigt hat, daß anophthalme Fundulusembryonen doch an den Seiten des Kopfes Linsen aufweisen und auch asymmetrische Monstra mit einem Auge an einer Seite, an der anderen ohne Auge doch eine Linse besitzen können, sind die Naturexperimente zur Feststellung formativer Beziehungen zwischen verschiedenen Teilen der Augenanlagen nicht mehr allgemein für die Wirbeltiere, sondern höchstens für jene Tiergruppe zu benutzen, von der die Mißbildungen stammen, und auch das nur, wenn die Mißbildungen in größerer Zahl und genau auf eventuell doch vorhandene Linsen hin untersucht wurden. Es ist deshalb ein glücklicher Zufall, daß unabhängig und ungefähr gleichzeitig mit Herbst Spemann die gleiche Frage experimentell an Rana fusca geprüft und in dem gleichen Sinne wie dieser beantwortet hat. Spemann tötete mit einer erhitzten Nadel oder mit einem Galvanokauter einen Teil der Vorderhirnanlage ab. Entstand infolgedessen an der operierten Seite eine kleine Augenblase, welche die Epidermis nicht erreichte, so bildete sich auch keine Linse; und man kann gegen das Experiment nicht einwenden, daß dieser Ausfall der Linsenbildung nach Ausbleiben der Berührung durch die Augenblase einfach auf einer Schädigung der linsenbildenden Stellen durch die heiße Nadel resp. den Galvanokauter beruht, denn die seitlichen Partien der Medullarplatte, welche näher an der Operationsstelle lagen, wurden nicht geschädigt. Die Auslösung der Linsenbildung durch die Berührung der Epidermis durch die Augenblase wurde dann weiter festgestellt bei Rana sylvatica und palustris (Lewis), bei Bombinator pachypus (Spemann), bei Triton taeniatus (Spemann) und bei Amblystoma punctatum (Le Cron). Keine andere Berührung als die Berührung durch die Augenblase ist zur Auslösung der Linsenbildung fähig, denn befinden sich zwischen Epidermis und Augenblase Bindegewebszellen, so bleibt die Linsenbildung aus. Die Berührung muß also die spezifische des retinalen Teiles der Augenblase sein. Es ist das Einfachste, wenn man da an eine besondere chemische Beschaffenheit des berührenden Körpers denkt. Bei der Linsenbildung muß außerdem die Berührung mit der Augenblase und mit dem Augenbecher eine kontinuierliche sein, denn wird der Augenbecher während der Linsenausbildung entfernt, so geht letztere zwar noch ein bischen weiter, bleibt dann aber stehen. Das ist wenigstens für Amblystoma durch Le Cron nachgewiesen. Weiter kommt hinzu, daß die Berührung durch die Augenblase die Linsenbildung nicht etwa nur in Gang setzt resp. im Gang hält, sondern auch den Ort und die Qualität der Organanlage bestimmt, daß also nicht be-

Digitized by Google

stimmte Epidermiszellen von vornherein zur Lieferung der Linse unabänderlich determiniert sind und zu ihrer Entwickelung nur des Anstoßes durch die Augenblase bedürfen. Darauf deutet schon die Tatsache, hin, daß experimentell verkleinerte Augenbecher auch entsprechend kleine Linsen erhalten. Bewiesen wurde das aber durch die Transplantationsversuche von Lewis an Rana palustris und Rana sylvatica und diejenigen von Spemann an Bombinator pachypus. In den Lewisschen Fällen scheint die Fähigkeit der Epidermis, Linsen zu bilden, weiter nach hinten zu reichen als bei Bombinator, wo wohl andere Kopfhaut, aber nicht Rumpfhaut unter dem Einfluß des Augenbechers eine Linse bilden konnte. Alle diese Tatsachen gelten aber nur für die genannten Species, denn für Rana esculenta hat Spemann selbst die unabhängige Entstehung der Linse nachgewiesen, und für Salmo salar und Fundulus heteroclitus ist ein gleiches durch Mencl und Stockard geschehen. Der krasse Unterschied zwischen den beiden Tiergruppen scheint durch Uebergänge gemildert zu sein, wenigstens hat Miß King bei Rana palustris, wo Lewis abhängige Differenzierung feststellte, in einigen Fällen an den Linsenbildungsstellen auch bei Abwesenheit des Augenbechers Wucherungen konstatiert, die wohl als rudimentäre Ansätze zur Linsenbildung zu bezeichnen sein dürften. Noch undeutlichere Ansätze sah auch Spemann unter Umständen bei Bombinator pachypus nach Ausschaltung des Augenbechers entstehen. Die Gründe, weswegen sich die einen Tiere bei der Linsenbildung so, die anderen anders verhalten, sind jedenfalls nicht in entfernterer Verwandtschaft zu suchen, was das verschiedene Verhalten von Rana fusca und esculenta beweist.

4b) Die Bildung des Corneaepithels des Wirbeltierauges. Spemann und Lewis haben nachgewiesen, daß die Aufhellung und Umbildung der pigmentierten Epidermis zum Corneaepithel ebenfalls davon abhängig ist, ob die Augenblase die Epidermis erreicht oder nicht.

5. **Die Beeinflussung der Regenerationsprozesse durch das Nervensystem.** Morgulis hat richtig erkannt, daß es sich in dem Herbstschen Falle der Abhängigkeit der Entstehung eines neuen Auges oder einer heteromorphen Antennula um eine andere Art der Beeinflussung der Regenerationsprozesse handelt als in jenen Fällen, wo die Regeneration von Gliedmaßen durch Nervendurchschneidung gehemmt wurde. Während es sich nämlich im ersteren Falle um die Beeinflussung der Qualität des Regenerates handelt, kommt die letztere in den anderen Fällen nicht in Frage, sondern repräsentiert die Anwesenheit des Nervensystems nur eine zur Regeneration notwendige Bedingung. Sichere Beweise zur Annahme des Gegenteils liegen nämlich zurzeit nicht vor; vielmehr sprechen einige von Giesbrecht bei Krebsen zutage geförderte Tatsachen gegen eine Beeinflussung der Qualität des Regenerates durch die zu den amputierten Gliedmaßen gehörigen Ganglien. Der erste, welcher die Bedeutung des Nervensystems für die Regeneration der Tritonextremitäten erkannte, war nach Gustav Wolffs Mitteilung Todd (1823). Dann hat aber Wolff selbst unabhängig von diesem Forscher und auch von Rubin, der ähnliche Resultate erlangte, Untersuchungen über die gleiche Frage angestellt und gefunden, daß die Regeneration der hinteren Extremitäten von Triton solange verhindert ist, als der nervöse Zusammenhang mit dem Zentralnervensystem unterbrochen ist, und daß das Vorhandensein der Spinalganglien und die Verbindung des Regenerationsherdes mit diesen allein zum Ablauf der Regeneration genügt. Diese Schlußfolgerungen waren von einigen Forschern bestritten worden, haben aber durch fortgesetzte, langandauernde Versuche von Wolff selbst und von F. K. Walter Bestätigung gefunden. Man darf aus diesen Ergebnissen allerdings noch nicht schließen, daß nur die sensiblen Nerven zur Beeinflussung der Regeneration der Tritonextremitäten fähig sind, da, um dies zu beweisen, die Spinalganglien allein entfernt werden müßten, wie Walter richtig bemerkt. In dem Herbstschen Falle sind es aber die sensiblen und nicht die motorischen Zentren, da mit dem Augenstiel nur die Zentren der Photorezeption, nicht aber jene Ganglienzellengruppen, aus denen die Bewegungsnerven des Stielauges stammen, entfernt werden. Für die Regeneration des Tritonschwanzes ist nach Godlewski „das Vorhandensein des unverletzten oder aber regenerierten Rückenmarkes eine Bedingung des normalen Ablaufes des Regenerationsprozesses“, die aber hier nicht durch das alleinige Vorhandensein der Spinalganglien ersetzt werden kann. Ganz neuerdings hat schließlich Morgulis an den amputierten Armen von Ophioglypha lacertosa festgestellt, „daß die Anwesenheit des Nervs an der Schnittfläche eine conditio sine qua non der vollkommenen Regeneration ist“.

D. Funktionelle Anpassung und Ontogenese.

Es ist bekannt, daß nicht nur die äußere Form, sondern auch die innere Struktur der Organe in Beziehung zu ihrer Funktion steht, welche als passive Inanspruchnahme

Digitized by Google

oder als aktive Betätigung auftreten kann. Das Entsprechen von innerer Struktur und Funktion kann derartig weitgehend sein, daß bei einem Minimum von Material das Maximum an Funktion geleistet wird. Roux nennt solche Strukturen: funktionelle Strukturen.

1. Aufzählung einiger funktioneller Strukturen. 1a) Die funktionelle Struktur der Knochen ist das klassische Beispiel, welches auf Culmann zurückgeht, der bei Betrachtung H. v. Meyerscher Präparate der Knochenspongiosa entdeckte, daß der Verlauf der Bälkchen in der Spongiosa des Oberschenkelendes des Menschen ein ähnlicher ist, wie der Verlauf der Druck- und Zuglinien in einem dem Oberschenkel ähnlich geformten und ähnlich belasteten Träger sein würde. Die Knochenbälkchen sind also in den Linien stärksten Druckes und Zuges angeordnet.

1b) Die funktionelle Struktur der Delphinflosse. Ein außerordentlich genaues Studium des Baues der Delphinflosse führte W. Roux zu dem Resultat, „daß ... die gefundenen mannigfachen Verlautsrichtungen der Fasern in der Flosse allenthalben den Richtungen stärkster Beanspruchung entsprechen, daß somit die ganze Konstruktion mit dem verwandten Material das Maximum an Widerstandsfähigkeit leistet, oder daß umgekehrt die geleistete Widerstandsfähigkeit mit dem Minimum an Material erreicht wird".

1c) Andere funktionelle Strukturen geben sich nach v. Bardeleben in der Anordnung der Fasern der Fascien und nach Roux in der der Fasern des Trommelfelles zu erkennen. Auch die quere Stellung der Elemente der Gefäßmuscularis könnte mit aufgezählt werden.

2. Die Rouxsche Erklärung der Entstehung funktioneller Strukturen. Die Rouxsche Erklärung der Entstehung funtioneller Strukturen ist außerordentlich einfach und gerade deswegen auf den ersten Blick hin sehr einleuchtend. Roux knüpft an die bekannte Tatsache der funktionellen Anpassung an, daß die Ausübung der Funktion die Organe befähigter zum Funktionieren macht, während mangelhafte Ausübung eine geringere Befähigung zu der betreffenden Funktion herbeiführt, und er sucht diese funktionelle Anpassung durch die Annahme zu erklären, daß die Ausübung der Funktion einen trophischen Reiz auf die funktionierenden Elemente ausübt, wodurch dieselben zu stärkerem Wachstum und zur Vermehrung und damit zur Hypertrophie veranlaßt werden. Die schwächer oder gar nicht funktionierenden Elemente bleiben dagegen im Wachstum zurück, ja können sogar gänzlich zum Schwunde gebracht werden, wenn ihnen von den stärker funktionierenden die notwendigen Nahrungsstoffe entzogen werden. Es bleiben am Ende also nur die Elemente, welche in den Richtungen stärkster Inanspruchnahme liegen, übrig.

3. Ist die Rouxsche kausale Ableitung der Entstehung der funktionellen Strukturen imstande, die Ausbildung der letzteren während der Ontogenese zu erklären? Angesichts dieser Frage müssen wir zunächst darauf aufmerksam machen, daß Roux das gesamte Leben des Individuums in 4 kausale Hauptperioden einteilt. Die erste Periode wird von ihm die Periode der Organanlage oder auch die Periode des von der Funktion unabhängigen Gestaltens und Wachsens genannt. In ihr „sind zur Erhaltung des Gebildeten und zur weiteren typischen Gestaltbildung die Ausübung der ‚Erhaltungsfunktionen' sowie die zu diesen Funktionen gehörigen funktionellen Reize nicht erforderlich. Es gibt ... noch keine Inaktivitätsatrophie. Aber abnorme Vergrößerung der Blutzufuhr, Hyperämie, veranlaßt abnorm großes Wachstum." In der zweiten Periode finden sich die Merkmale der ersten und dritten gemeinsam vor. Die dritte Periode ist dadurch charakterisiert, „daß das weitere Wachstum und die weitere funktionelle Ausgestaltung nur noch durch die gestaltende Nebenwirkung der Vollziehung der Erhaltungsfunktionen bezw. durch die trophische Nebenwirkung der funktionellen Reize möglich ist". Es ist also die Periode des funktionellen Reizlebens. In ihr kommt Aktivitätshypertrophie und -atrophie vor, dagegen bewirkt in ihr Hyperämie allein kein gesteigertes Wachstum mehr. Die vierte Periode schließlich ist die „der normalen, also von Erkrankung freien Senileszenz, des Seniums". Herbst hat nun in seinen „Formativen Reizen" darauf hingewiesen, daß die Rouxsche Erklärungsweise der funktionellen Strukturen sich dann auf die ontogenetische Entstehung derselben anwenden ließe, wenn die Anlage dieser Strukturen in der ersten Periode unregelmäßig wäre und sich erst in den beiden späteren Perioden aus dieser unregelmäßigen Anordnung der Elemente eine der größten Inanspruchnahme entsprechende herausbilden würde. Unter den ontogenetischen Prozessen ist aber bis jetzt noch kein sicheres Beispiel für ein solches Geschehen festgestellt worden, vielmehr hat sich herausgestellt, daß verschiedene funktionelle Strukturen, wie z. B. die Knochenarchitektur, zum mindesten in ihren Grundzügen bereits in der ersten, funktionslosen Periode der Ontogenese entstehen. Unter den Regenerationsprozessen ist dagegen ein hier-

Digitized by Google

her gehöriger Fall von Oskar Levy experimentell festgestellt worden. Derselbe konstatierte nämlich, daß nach Durchschneidung der Achillessehne und nach der Muskelexstirpation beim Kaninchen die Narbe selbst 30 Tage nach der Operation nur von einem unregelmäßigen Geflecht von Bindegewebsfasern ausgefüllt war, während eine gleichalte einfache Tenotomienarbe bereits die typische parallelfaserige Struktur der Sehne erkennen ließ. Wurde aber in die Narbe, die sich nach Tenotomie und gleichzeitiger Muskelexstirpation bildete, ein Faden in querer Richtung eingeheilt, und durch diesen ein Zug auf das Narbengewebe ausgeübt, so bildeten sich die Fasern in dieser Zugrichtung, also senkrecht zum normalen Verlauf der Sehnenfasern, aus.

4. Zwei andere Erklärungsweisen für gewisse Arten von funktionellen Strukturen. 4a) Herbeiführung der funktionellen Anordnung der Bindegewebsfasern durch einfaches mechanisches Zurechtziehen. Diese Möglichkeit der Herstellung funktioneller Strukturen, die z. B. bei der Bildung der Faszien und des Trommelfelles in Frage kommen könnten, hat Roux bereits selbst erörtert und als wahrscheinlich nicht das Rechte treffend bezeichnet. Auch Levy diskutiert sie in seiner Sehnenarbeit, lehnt sie aber zugunsten der ersten Rouxschen Hypothese ab und gesteht nur zu, daß der Zug rein mechanisch den komplizierteren Reaktionsprozeß vielleicht insofern unterstützt haben könne, als durch ihn minder fest verflochtene Bündel in die Längsrichtung gezogen worden seien.

4b) Funktionelle Strukturen als Folge von Richtungsreizen. Eine Hypothese, welche für manche funktionelle Strukturen das Richtige treffen kann, hat Herbst in seinen „Formativen Reizen" ausgesprochen. Er macht nämlich darauf aufmerksam, daß in manchen Fällen ein Richtungsreiz gleich von vornherein die regelrechte Anordnung der Elemente in Richtung der stärksten Inanspruchnahme herbeiführen kann. Wie nämlich z. B. ein phototaktisches Protozoon solange Bewegungen ausführt, bis es mit seiner Längsachse in Richtung der Strahlen eingestellt ist, so kann möglicherweise eine polymorphe Mesenchymzelle, die einem einseitigen Zug ausgesetzt ist, erst dann zur Ruhe kommen, wenn sie mit ihrer Längsachse in der Zugrichtung liegt. Wenn die Zellen dann beginnen, Bindegewebs- oder Muskelfasern abzusondern, so kann sofort ohne den Umweg über die Atrophie der nicht funktionierenden und die Hypertrophie der funktionierenden Elemente die funktionelle Struktur entstehen. Diese Erklärungsweise kann natürlich nur auf solche funktionelle Strukturen Anwendung finden, welche in der 2. und 3. Rouxschen Periode entstehen.

5. Einige andere Fälle der Beeinflussung der Gestaltung durch die Inanspruchnahme. Läßt man die Embryonen von Salamandra atra sich anstatt im Uterus der Mutter im Wasser entwickeln, so werden die Kiemen kürzer und derber, während die Kiemen der Larven von S. maculosa bei zwangsweise verlängertem Aufenthalt im Mutterleib zarter und länger werden (Kammerer). Wird eine Partie Kaulquappen nur mit pflanzlicher, eine andere nur mit tierischer Kost gefüttert, so bekommen die ersteren einen längeren Darm mit viel mehr Spiraltouren und engerem Lumen als die letzteren (Babák). Wird ein Stück Vene in eine Arterie eingepflanzt, so nimmt die Wandung desselben die Beschaffenheit einer Arterie an (B. Fischer und Schmieden). Wird ein Hund infolge Exartikulation der Vordergliedmaßen gezwungen, mit den Hinterbeinen zu hüpfen, so wird die Tibia im Verhältnis zum Femur etwas länger (Fuld). Alle diese Fälle, deren Zahl sich leicht noch vermehren ließe, gehören der zweiten und dritten Periode der tierischen Entwickelung an.

E. Die Theorie der formativen Reize und das Problem der anfänglichen Selbstdifferenzierung der Organe und ihrer späteren Abhängigkeit von anderen.

1. Auseinandersetzung der Theorie. Den Ausgangspunkt für die Theorie der formativen Reize bilden zweierlei Probleme. Das erste ist in der Tatsache enthalten, daß die meisten Organe aus mehr als einer Anlage entstehen, die aus demselben, aber auch aus verschiedenen Keimblättern stammen können. Wie kommt es, daß diese verschiedenen Teile sich in der Norm immer richtig zusammenfinden und ein einheitliches Ganze bilden? Das zweite aber war in der zuerst von Driesch aufgedeckten Aequipotentialität der Keimblätter gegeben und gipfelt in der Frage, von was denn nun eigentlich das Schicksal dieser gleichvermöglichen Keimblattbezirke in dem einzelnen Falle bestimmt wird? Die Antwort auf diese letztere Frage war die: das Schicksal eines Bezirkes wird dadurch bestimmt, zu welcher anderen Organanlage er in Beziehung kommt. Eine Wirkung, die von letzterer ausgeht, wirkt als spezifischer Reiz und löst an dem Bezirk von den verschiedenen Reaktionsmöglichkeiten ebenfalls eine ganz spezifische aus. Wäre derselbe Keimblattbezirk von einem anderen Reiz getroffen worden, so hätte er auch mit einer anderen Bildung, die in seiner Potenz liegt, geantwortet. Diese Antwort löst nun aber

Digitized by Google

zugleich das erste Problem mit: Deswegen kommen die verschiedenen Teile einer Gesamtorgananlage zusammen, weil der eine die Bildung des anderen seiner Qualität und seinem Orte nach bestimmt. So wurde der Begriff des formativen Reizes geprägt, der dann noch an der Hand der Tatsachen seiner kausalen Wertigkeit nach in verschiedene Kategorien geteilt wurde, denn nicht überall bestimmt ja ein Reiz zugleich Ort und Qualität einer Organbildung, obgleich er immer eine qualitative Veränderung des Ganzen zur Folge hat, auch wenn er nur den Ort einer Organbildung festlegt, denn wäre die letztere an einen anderen Ort verlegt worden, so wäre auch die Form und somit die Qualität des Ganzen geändert worden. So wurde die Ontogenese in eine geordnete Reihe von Reizeffekten aufgelöst. Entstanden ist diese Theorie durch Zusammenschweißen von Ideen und Tatsachen, welche sich in Driesch's entwickelungsmechanischen Studien, namentlich in dem zehnten Teil derselben, und in den Lithiumarbeiten von Herbst, besonders in Nr. 2 derselben, vorfanden. Es ist nicht zu leugnen, daß diese Theorie zumal auf die Frage, wie verschiedene Teilanlagen zu einem einheitlichen Organ zusammenkommen, eine überraschend einfache Antwort gab.

2. Die Kritik der Theorie der formativen Reize. Trotzalledem ist aber die Kritik der Theorie der formativen Reize durch die später gefundenen Tatsachen nicht günstig ausgefallen, denn es haben sich die Organanlagen in zu vielen Fällen als Selbstdifferenzierungen entpuppt und vor allen Dingen sogar auch in vielen solchen Fällen, wo ein System nicht nur aus anfänglich getrennten Anlagen entsteht, sondern wo sich sogar auf späteren Stadien ein ausgesprochenes Abhängigkeitsverhältnis zu erkennen gibt. So ist das Problem komplizierter geworden, als es zu sein schien, denn Selbstdifferenzierung ist, wie Roux richtig betont, keine Wirkungsweise, sondern sagt nur etwas über den Sitz der Faktoren aus, von denen die Organbildung abhängt. Ueber diese selbst erfahren wir aber gar nichts und es nützt uns auch nichts, wenn man mit Roux sagt: „Jede Selbstdifferenzierung eines Gebildes besteht in ihrem Geschehen aus Wirkungen von Teilen desselben aufeinander“, denn wir wissen von diesen Wirkungen noch gar nichts.

3. Aufzählung einiger Fälle von Selbstdifferenzierung. Zum Studium der Selbstdifferenzierungsfähigkeit von Körperteilen oder Organen und Organteilen haben sich, abgesehen von der einfachen operativen Entfernung umschriebener Bezirke aus Embryonen, noch die Transplantationsmethode und neuerdings die berühmte Harrisonsche Methode der isolierten Züchtung kleiner isolierter Embryonalbezirke in einem Lymphtropfen unter dem Deckglas als äußerst nützlich erwiesen. Wir wollen zunächst nur

3a) einige einfache Fälle von Selbstdifferenzierung nennen: Im typischen Verlauf der Entwickelung der Seeigel entsteht die Mundeinsenkung da, wo sich das freie Ende des Urdarms an das Ektoderm anlegt. Trotzdem wird dieselbe auch dann gebildet, wenn die Berührung der betreffenden Stelle mit dem Urdarmende unterbleibt (Driesch, Herbst). Wenn sich bei der Entwickelung des Wirbeltierauges das Linsensäckchen einzustülpen beginnt, entsteht auch aus der Augenblase der Augenbecher, und es wäre möglich, daß diese Umformung der Blase zum Becher eine Folge der Einstülpung des Linsensäckchens ist. Der operative Eingriff und das Transplantationsexperiment zeigten aber, daß sich der Augenbecher auch ohne Vorhandensein einer Linsenanlage bildet und weiter differenziert (Herbst nach Dareste, Spemann, Lewis). Die vorderen Extremitäten der Anuren entstehen unter dem Kiemendeckel, gegen den sie sich von innen stemmen. Wenn die Verwandlung eintritt, wird die Haut des Kiemendeckels über der dagegenstemmenden Extremität dünner und es entsteht darauf ein Loch, durch welches die Gliedmaße hervortritt. Braus wies durch Exstirpation der Gliedmaßenanlage nach, daß dieses Armloch sich zur rechten Zeit auch ohne Vorhandensein eines Armes bildet. Wird die Anlage einer Vordergliedmaße der Unke an Stelle eines Hinterbeines eingepflanzt, so bildet sich dieselbe doch zu einem Vorderbein aus (Braus). Wird bei dem gleichen Objekt die Schultergürtelanlage verkleinert, so bildet sich aus derselben ein typischer Schultergürtel von verkleinerten Proportionen und also auch mit verkleinerter Gelenkpfanne, für welche dann der Humeruskopf zu groß ist. Kopf und Pfanne zeigen also das Phänomen der Selbstdifferenzierung (Braus). Demselben Forscher gelang es sogar, die isolierte Herzanlage nach der Harrisonschen Methode unter dem Deckglas zur Weiterentwickelung zu bringen. Nissl sah isolierte Teile der noch nicht vollständig entwickelten Hirnrinde neugeborener Kaninchen sich in allen Schichten und mit allen cytarchitektonischen Einzelheiten weiter ausbilden. An der Hand der Transplantationsarbeiten von Born, Harrison, Lewis und Spemann ließen sich diese Beispiele noch beliebig vermehren.

3b) Selbstdifferenzierung von Systemteilen, deren Erhaltung auf späteren Stadien von anderen Teilen desselben Systems abhängig ist. Nach den Untersuchungen von Harrison entstehen die Muskeln der Anuren unab-

Digitized by Google

hängig vom Nervensystem, obgleich bekanntlich die Erhaltung der ausgebildeten Muskeln von ihrer Verbindung mit dem Nervensystem abhängig ist. Ebenso ist in einigen Fällen die Abhängigkeit der Erhaltung der Sinnesorgane von den zugehörigen Nerven nachgewiesen, z. B. bei den Schmeckbechern der Zunge (v. Vintschgau und Hönigsschmied). Trotzalledem aber sah Harrison bei Froschembryonen die Anlage der Seitenlinie von vorn nach hinten auswachsen und sich zu Sinnesknospen differenzieren, auch wenn er die Entwickelung des dazu gehörigen Nerven durch Entfernung des Vagusganglions verhindert hatte.

4. Versuch einer einheitlichen Auffassung des ganzen Tatsachenmaterials. Im Vergleich zu der verhältnismäßig geringen Zahl von Fällen, wo ontogenetische Gestaltungsprozesse allem Anscheine nach durch einen Reiz, der von einem anderen Teil des Embryos ausgeht, ausgelöst werden, ist die Zahl jener anderen Fälle, in denen Selbstdifferenzierung zum mindesten zu Anfang festgestellt worden ist, außerordentlich groß und wird sozusagen täglich größer. Es fragt sich nun, soll man die beiden, zunächst ganz heterogen erscheinenden Tatsachenreihen ruhig beieinander stehen lassen oder doch wenigstens den Versuch machen, sie zu vereinigen. Die eine Möglichkeit haben wir bereits kennen gelernt, sie besteht in der Annahme, daß in den Bezirken, welche Selbstdifferenzierung zeigen, abhängige Differenzierung der Unterteile stattfände. So wäre schließlich alles ontogenetische Geschehen in gegenseitige formative Beeinflussungen der Embryonalteile aufgelöst. Das ist der Standpunkt, den Herbst in seinen „Formativen Reizen" einnahm. Es ist nun aber noch ein anderer Standpunkt denkbar, den, aus gewissen Aeußerungen zu schließen, Spemann zu vertreten scheint und dem auch Referent entgegen seiner früheren Meinung jetzt zuneigt. Man erklärt sich durch die hypothetische Auflösung der Selbstdifferenzierung in „differenzierende Wechselwirkungen der Unterteile" der betreffenden Bezirke nicht für zufriedengestellt, sondern nimmt die Selbstdifferenzierung zunächst einfach als noch nicht aufgeklärtes Phänomen hin. Um nun alle Tatsachen, die wir in den letzten Abschnitten über die formativen Beziehungen der Embryonalteile untereinander kennen gelernt haben, unter einen Hut zu bringen, braucht man nur die folgenden vier, durch die Tatsachen mehr oder weniger gerechtfertigten Verallgemeinerungen zu machen: 1. Die erste Anlage der Organe ist stets Selbstdifferenzierung. 2. Die Embryonalteile treten erst nach der anfänglichen Selbstdifferenzierung zu anderen in ein Abhängigkeitsverhältnis. 3. Dieser Einfluß des einen Embryonalteiles auf den anderen, der mit ihm in Beziehung tritt, kann in einigen Fällen, wie z. B. bei den Augenblasen mancher Amphibien oder bei den Armstützen der Seeigellarven, so groß werden, daß durch diesen Einfluß sogar ortsfremde Zellenbezirke zu derselben Bildung veranlaßt werden können. 4. Der Zeitpunkt, an dem die selbstdifferenzierte Organanlage in Abhängigkeit gerät, schwankt von Tierform zu Tierform, ja vielleicht in geringem Grade sogar von Individuum zu Individuum, und zwar kann in den einen extremsten Fällen die Abhängigkeit schon notwendig werden, wenn die Organanlage für uns noch gar nicht äußerlich wahrzunehmen ist, während in den anderen extremsten Fällen dieselbe erst nach vollkommener Ausbildung der betreffenden Teile eintritt. Die erste Kategorie erweckt dann natürlich den Anschein, als ob der von einem Teil ausgehende Reiz den betreffenden Bildungsvorgang in Gang setze, während er tatsächlich nur die Weiterentwickelung desselben bewirken würde. Es gäbe dann natürlich in der Ontogenese keine organbildungauslösenden formativen Reize mehr, sondern nur Wirkungen, die von einem Embryonalteil ausgehen und die Weiterentwickelung oder Erhaltung eines anderen Organismenteils herbeiführen. Blättert man nun zurück und überschaut alles, was über gestaltliche Beeinflussung der Organismenteile untereinander und über Selbstdifferenzierung gesagt wurde, noch einmal, so wird man einsehen, daß es uns gelungen ist, die scheinbar prinzipiellen Gegensätze in graduelle umzustempeln.

F. Die inneren Komponenten der Organbildungen.

Die Organbildungen in der Ontogenie der Metazoen setzen sich aus einer verschieden großen Zahl einzelner Geschehnisse zusammen, sind also komplexe Phänomene, die wir schließlich in diesem Schlußabschnitt noch in ihre einzelnen Komponenten auflösen wollen. Es braucht dies aber nur ganz kursorisch zu geschehen, da wir hier auf Dinge stoßen werden, die auch in anderen Artikeln dieses Werkes ihre Behandlung finden. Wir teilen diese inneren Komponenten oder inneren Mittel, wie sie Driesch nennt, mit diesem Forscher zunächst in zwei Rubriken ein, in die physiologischen und die physikalischen.

1. Die physiologischen Komponenten. Sie mögen zerfallen in: Wachstum, Zellteilung, Zellbewegung und Zellsekretion. 1a) Das Wachstum.[1]) Das Wort Wachstum wird bisweilen in einem außerordentlich weiten Sinne gebraucht, so daß es sogar Differen-

[1]) Vgl. den Artikel „Wachstum".

Digitized by Google

zierungen, also qualitative Veränderungen mit umfaßt. Hier sollen aber unter Wachstum nur quantitative Veränderungen verstanden werden. Letztere bestehen in Volumen-, Gewichts- und Flächenvergrößerungen, die meist alle drei zusammen vorkommen, doch ist es z. B. auch möglich, daß Flächenvergrößerung keine Folge von Volumenvergrößerung ist, wenn Faltenbildung in innere Hohlräume hinein stattfindet. Daß bei der Volumen- und Gewichtszunahme der Keime Wasseraufnahme die Hauptrolle spielt, wurde bereits vorn im Kapitel über die äußeren Faktoren genau geschildert. Hier sei nur noch betreffs des Wachstums im allgemeinen auf Resultate hingewiesen, zu denen Wolfgang Ostwald und Robertson, welcher den Gedanken J. Loebs von der autokatalytischen Vermehrung der Kernsubstanzen weiter verfolgte, unabhängig voneinander gekommen sind. Ostwald studierte den zeitlichen Verlauf sehr verschiedener Entwickelungsvorgänge an der Hand der Angaben anderer Forscher sowie zum Teil nach eigenen Untersuchungen und kam dabei zu dem Resultat, daß die Kurven dieser Vorgänge, zu denen z. B. die Volumenzunahme des Chromatins im Seeigelkeim, die jährliche Gewichtszunahme der Keimdrüsen des Lachses, die Quellung der weißen Bohne, die Gewichtszunahme der Froschlarven, die postembryonale Gewichtsänderung des Meerschweinchens usw. gehören, S-Form aufweisen. D. h. „die Geschwindigkeit des betreffenden Vorgangs beginnt mit einem niedrigen Werte, wächst mit dem Fortschreiten des Vorgangs und nimmt gegen Ende desselben wieder ab“. Er nennt nun Vorgänge, die sich in dieser Weise selbst beschleunigen, autokatakinetische und sucht dann weiter den Nachweis zu führen, daß die autokatakinetischen Vorgänge in der embryonalen und postembryonalen Entwickelung der Organismen mindestens zum größten Teil autokatalytische, d. h. chemische Prozesse seien, die sich in ihrem Verlaufe selbst beschleunigen. Es verdient jedoch darauf hingewiesen zu werden, daß Ostwald selbst auch die Existenz autokatakinetischer Vorgänge physikalisch-chemischer und rein physikalischer Natur in der Entwickelung für sehr wahrscheinlich hält.

1b) Die Zellteilung. *α*) Ihre Rolle bei der Organbildung. Es ist zwar das häufige oder auch massenhafte Vorkommen von Zellteilungen ein Hauptcharakteristikum der normalen Embryonalentwickelung der Metazoen, doch verdient darauf hingewiesen zu werden, daß die Orte der Zellvermehrung nicht mit den Orten der Organbildung unbedingt zusammenzufallen brauchen, was z. B. aus der Beschreibung der Seeigelentwickelungsgeschichte von Schmidt deutlich hervorgeht. An den Orten, wo die Pluteusarme auswachsen, findet nicht etwa eine besonders starke Zellenvermehrung statt. Ja nicht einmal die Stadien, auf denen Zellenvermehrung stattfindet, brauchen mit den Stadien, wo Organbildung stattfindet, unbedingt zusammenzufallen, wofür die Ausbildung der Trochophora von Polygordius als Beweis angeführt werden kann, die sich nach Woltereck vom Gastrulastadium ab fast ohne Zellteilung vollzieht. Auch bei der Reparation der Hydroidpolypenköpfchen spielen Zellteilungen nach den Untersuchungen von Godlewski und Miß Stevens eine untergeordnete Rolle.

β) Die Richtung der Zellteilung. Von großem entwickelungsphysiologischem Interesse ist die Frage nach den Faktoren, welche die Richtung der Zellteilung bestimmen. O. Hertwig macht hierfür die Richtung der größten Plasmaausdehnung verantwortlich. In ihr stellt sich die Spindel mit ihrer Längsachse ein, so daß also die Zellteilung senkrecht zu ihr erfolgt. O. Hertwig kann sich dabei vor allen Dingen auch auf die zuerst von Pflüger am Froschei ausgeführten Pressungsversuche berufen, welche zeigen, daß sich die Furchungsspindeln der zwischen 2 Glasplatten gepreßten Eier parallel zu den drückenden Platten, also in der Richtung der größten Plasmaausdehnung, einstellen. Pflüger selbst hatte aus solchen Experimenten zwar den Schluß gezogen, daß sich die Kernspindeln mit ihren Längsachsen in der Richtung des geringsten Widerstandes einstellen, doch ist diese Ansicht von Born abfällig kritisiert worden, so daß man sich jetzt nur noch auf den Hertwigschen Satz beruft, dem man den Wert einer Regel zugestehen kann. Bemerkenswert ist, daß bei der ersten Teilung des Eies von Ascaris nigrovenosa die erste Anlage der Spindel nach Auerbach in der Richtung des kleinsten Eidurchmessers stattfindet, daß darauf aber eine Drehung des ganzen Kernapparates in der Weise erfolgt, daß die ausgebildete Spindel nunmehr in der Richtung des größten Durchmessers liegt. Ausnahmen von der Hertwigschen Regel haben dagegen Roux, Bergh, zur Strassen und Jennings konstatiert. Ersterer hat nämlich darauf hingewiesen, daß bei Froscheiern, die in schiefer Zwangslage gehalten werden, in einem Teil der Fälle die erste Furche durch den Strömungsmeridian geht, daß sich also die Kernspindel hier rechtwinkelig zur Symmetrieebene des Bildungsdotters, die nach Roux's Meinung der größten Ausdehnung desselben entspricht, eingestellt habe. Die Teilung der Zellen einschichtiger Zylinderepithelien widerspricht dagegen der Hertwigschen Regel nicht, da sich diese Zellen vor der Teilung abrunden, wie Korschelt am Blastulaepithel der Seeigel festgestellt hat.

Digitized by Google

γ) Die Größe der Tochterzellen. Ueber die Ursachen der inäqualen Zellteilung können wir nur das eine aussagen, daß bei Eiern mit viel einseitig angehäuftem Nahrungsdotter die Größe der Zellen der Größe des Dottergehaltes proportional ist. Die Zellregion mit der größeren Dottermasse liefert bei der Zellteilung die größere Tochterzelle. Vielfach genügen aber so deutlich sichtbare Substanzansammlungen nicht, um die verschiedene Größe der Teilprodukte zu erklären. Natürlich wird das Problem auch nur verschoben, wenn man dafür die Größe und Lage der Spindel verantwortlich macht. Hypothesen aber, die von einer ungleichen Kraft der Zentren reden, sind gänzlich nichtssagend.

δ) Die definitive Größe der Zellen und die fixierte Kern-Plasmarelation R. Hertwigs. Driesch hat vor langer Zeit einmal darauf aufmerksam gemacht, daß die Zellteilungen während der Furchung tierischer Eier im Gegensatz zu jener späterer Entwickelungsstadien nicht mit Wachstum der Tochterzellen auf das Maß der Mutterzellen verbunden sind. Es findet also während der Furchung eine Verkleinerung der Zellen bis zu einer gewissen Größe statt. Fragen wir nun, welche Umstände die definitive Größe der Zellen bedingen, so müssen wir zunächst an Tatsachen anknüpfen, die wir schon im Kapitel über das Determinationsproblem kennen gelernt haben.

δ_1) Die Zellengröße verschieden großer Individuen. Driesch fand, daß bei kleinen und großen Individuen derselben Species nicht die Zellengröße, sondern die Zellenzahl verschieden ist, und daß dieser Satz nicht nur für Individuen gilt, die sich aus ganzen Eiern oder aus Bruchstücken von solchen entwickelt haben, sondern auch für Tiere, die kleinen oder großen ganzen Eiern entstammen. Dieser Satz von der fixierten Zellengröße und variablen Zellenzahl ist dann weiter durch Rabl an der Linse des Wirbeltierauges, durch Boveri an Zungenepithelzellen und Knochenkörperchen des Menschen, durch G. Levi an verschiedenen Zellenformen mannigfacher Tierspecies und durch Conklin an verschieden großen Individuen von Crepidula bestätigt worden. Nach den beiden letzteren Forschern bilden aber die Muskel- und Ganglienzellen Ausnahmen von der Regel. Ihre Größe variiert mit der Größe des Tieres. Der Regel von der fixierten Zellengröße widersprechen dagegen dem Anschein nach Angaben von Chambers, die sich auf Frösche und Kaulquappen aus großen und kleinen Eiern beziehen, doch dürften vielleicht erneute Studien diese Ausnahme zu einer nur scheinbaren umstempeln.

δ_2) Die fixierte Kernplasmarelation. Boveri hat den Nachweis erbracht, daß der Drieschsche Satz von der fixierten Zellengröße nur bei Vergleich von Individuen gilt, die aus Eiern mit derselben Menge von Kernmaterial stammen. Vergleicht man dagegen Individuen, die sich parthenogenetisch entwickelt und ihre Entwickelung mit einem Dyaster begonnen haben, mit solchen aus befruchteten Eiern, so ergibt sich, daß erstere halb so große Kerne und Zellen, aber doppelt so viele haben wie letztere. Vergleicht man ferner Individuen, die beide aus befruchteten Eiern stammen, von denen aber das eine seine Entwickelung mit einem Monaster an Stelle eines Dyasters begonnen hat, so hat das Individuum aus dem Monasterei doppelt so große Kerne und Zellen, aber halb so viele wie das andere, das seine Entwickelung in der gewöhnlichen Weise mit einem Dyaster angefangen hat. Und im Vergleich mit parthenogenetischen, halbkernigen (hemikaryotischen) Individuen hat es vierfach so große Kerne und Zellen, aber nur ein Viertel so viele. Daraus ergibt sich aber der Schluß, daß bei Individuen, die aus Eiern von gleicher Größe, aber mit verschiedener Kernmenge stammen, nicht die Zellgröße, sondern das Verhältnis von Kern- zu Plasmagröße gleich ist. Wir sind so zu einer Einsicht gelangt, die R. Hertwig als Satz von der fixierten Kernplasmarelation bezeichnet hat. Durch Studien an Protozoen war er zur Aufstellung dieses Satzes geführt worden. Wir können nunmehr die Frage, wie lange die Verkleinerung der Zellen bei der Furchung andauert, dahin beantworten: Solange, bis die fixierte Kernplasmarelation ganz oder annähernd erreicht ist. Es ist natürlich keineswegs gesagt, daß der Quotient $\frac{K}{P}$ für alle Furchungszellen gleich sein muß. Da die ungefurchten Eier Regionen verschiedener Beschaffenheit aufweisen, so weisen auch die Furchungszellen der verschiedenen Regionen des Keimes Differenzen auf, die von Einfluß auf den Wert des Quotienten $\frac{K}{P}$ sein können. Vergleichbar in bezug auf die Kernplasmarelation sind deshalb nur solche Zellen, welche dieselbe innere Beschaffenheit besitzen und sich unter denselben äußeren Bedingungen befinden. Es ist deshalb gar nicht wunderbar, daß Conklin nur in einander entsprechenden Blastomeren verschiedener Eier annähernd die gleiche Kernplasmarelation auffand, während er eine Konstanz dieser Relation bei Vergleich verschiedener Blastomeren desselben Eies oder verschiedener Eier nicht wahrnehmen konnte. Trotz der Skepsis, die sich bei manchen Forschern

Digitized by Google

gegen den Wert des Satzes von der fixierten Kernplasmarelation zu erkennen gibt, hält Referent denselben doch für eine wichtige Errungenschaft, wenn auch die von R. Hertwig und seinen Schülern daran angeknüpften weiteren Spekulationen noch wenig fundiert erscheinen mögen.

ε) Zellanordnung. Chabry ist wohl der erste gewesen, der die Aehnlichkeit der Anordnung der Furchungszellen mit Seifenschaum verglich (1887). Nach ihm sprach sich dann Driesch dahin aus, daß das Prinzip der kleinsten Flächen bei Furchungsstadien gilt, soweit es die Bedingungen des Systems gestatten, und wies Friedrich Dreyer in besonders umfassender Weise die Gültigkeit der Gesetze der Blasenspannung für die Anordnung tierischer Gewebezellen nach. Es stoßen 3 Flächen in einer Kante und 4 Kanten in einem Punkte zusammen, d. h. es gilt bei Schäumen ebenso wie bei Furchungszellenhaufen oder wie im Chordagewebe von Myxine das Plateausche Prinzip der kleinsten Flächen. Roux ist es dann gewesen, welcher besonders auf die Abweichungen von dem Plateauschen Prinzip bei der Anordnung von Embryonalzellen geachtet und gezeigt hat, auf welche Weise dieselben am einfachsten zu erklären seien, worauf wir im Schlußabschnitt zu sprechen kommen werden.

1c) Die Zellbewegung. *α*) Die Bewegung isolierter Zellen kommt nur in mesenchymatischen Geweben vor und ist in bezug auf ihre Ursachen der amöboiden Bewegung im allgemeinen gleichzustellen. *β*) Das Gleiten von in Kontakt befindlichen Zellen (Cytolisthesis Roux). Dasselbe wurde zuerst von Chabry an Furchungszellen der Ascidien beobachtet; es spielt nach Driesch eine große Rolle bei dem Zusammenschluß der Teilprodukte isolierter Furchungszellen und wurde in eingehender Weise von Roux an sich berührenden Furchungszellen des Froscheies studiert. *γ*) Unter Zelltrennung (Cytochorismus) versteht Roux das Lösen von Zellen aus dem Zusammenhang und unter *δ*) Cytarme den engen Zusammenschluß sich berührender Zellen. *ε*) Schließlich muß noch auf eine eigentümliche Zellenzusammenziehung in geschlossenen Verbänden hingewiesen werden, wie sie z. B. bei Bildung des Wimperringes der Echinodermen beobachtet wird. Der Wimperring besteht nämlich aus dicht zusammengedrängten Zellen, deren Anhäufung nicht durch lokalisierte intensive Zellteilung, sondern durch Zusammenziehen von Zellen in bestimmten Streifen der Larvenoberfläche zustande kommt. Alle diese hier aufgeführten Kategorien von Zellbewegung sind zunächst rein deskriptiver Natur. Ueber ihre Aetiologie wissen wir meist nur vermutungsweise etwas. In bezug auf Zelltrennung und Zellzusammenschluß ist bei Furchungszellenhaufen und Epithelien nur das eine bekannt, daß erstere bei Fehlen, letzterer bei Zufuhr von Kalk eintritt.

1d) Zellsekretion. Die Zellsekretion spielt bekanntlich beim Aufbau der reizleitenden, kontraktilen, füllenden und stützenden Gewebesysteme eine große Rolle, über ihr Zustandekommen wissen wir aber nichts Sicheres.

2. Die physikalischen Komponenten. Da die Frage nach der eventuellen Beteiligung osmotischer Prozesse an den Entwickelungsphänomenen bereits in dem Kapitel über die Notwendigkeit eines bestimmten Wassergehaltes für das Wachstum erörtert wurde, und da wir über den Anteil von Quellung an ontogenetischen Vorgängen noch nichts Sicheres wissen, so bleiben uns nur noch jene physikalischen Komponenten zu besprechen übrig, welche von dem flüssigen Aggregatzustand des Protoplasmas abhängig sind. Das Vorhandensein der ersteren setzt also die Richtigkeit der von Bütschli, Berthold, Quincke, Lehmann, Albrecht, Rhumbler u. a. vertretenen Ansicht voraus, daß das Protoplasma als Flüssigkeit anzusprechen ist. Rhumbler hat diese Frage in mustergültiger Weise behandelt, so daß man den flüssigen Aggregatzustand des Protoplasmas für viele Zellenkategorien als erwiesen ansehen kann. Er hat bei seiner Analyse besonders auch auf die Inkongruenzen zwischen homogenen Flüssigkeiten und lebenden Plasmamassen geachtet und gezeigt, wie dieselben sich beseitigen lassen, wenn man sich der Bütschlischen Anschauung von dem wabigen Bau des Protoplasmas anschließt. Der wabige Bau des Protoplasmas ermöglicht es, von einer Anomogenität der Zelloberfläche reden zu dürfen, da das Alveolenwerk an verschiedenen Stellen ganz verschieden beschaffen und demnach auch verschieden gespannt sein kann, so daß man trotz des flüssigen Aggregatzustandes gar nicht überall Minimalflächen erwarten darf. Mit dem Nachweis der flüssigen Beschaffenheit des Protoplasmas ist uns nun aber zugleich die Möglichkeit in die Hand gegeben, die inneren physiologischen Komponenten, welche wir im vorigen Abschnitt aufgezählt haben, mit Hilfe der Flüssigkeitsmechanik weiter kausal aufzulösen. Wie Bütschli u. a. die lokale Veränderung der Oberflächenspannung zur Erklärung der amöboiden Bewegung und der Zellteilung verwandt haben, dies zu schildern, gehört in andere Artikel dieses Werkes (s. die Artikel „Bewegung, allgemeine Physiologie der Bewegung“ und „Zellteilung“), hier sei nur

Digitized by Google

darauf hingewiesen, daß, wenn das Plasma tatsächlich die Charaktere einer Flüssigkeit besitzt, die einzelnen Zellen eines Eies unter der Voraussetzung, daß ihre Oberflächen ebenfalls flüssig und homogen sind, sich selbstverständlich wie Seifenblasen nach dem Prinzip der kleinsten Flächen anordnen müssen, und daß es nicht zu verwundern ist, wenn es Roux durch Teilung eines in Alkohol schwebenden und die Wände des Glases berührenden Oeltropfens in verschiedene Teile gelang, eine ganze Reihe von in der Natur vorkommenden Furchungsstadien von Eiern nachzuahmen. Die Ausnahmen von dem Minimalflächenprinzip aber kann man mit Roux auf die Anomogenität der betreffenden Zellen zurückführen; es muß jedoch betont werden, daß man bei Ableitung der Zellanordnung von den Gesetzen der Oberflächenspannung vorsichtig zu Werke gehen muß, da, wie Driesch im Anschluß an Zimmermann betonte, auch Turgorkräfte die Zellenmembranen auf ein möglichst geringes Maß zu reduzieren versuchen können, wie dies z. B. bei den nichtflüssigen Membranen in älterem pflanzlichem Gewebe der Fall ist. Auch für das Gleiten der Zellen kann man die Oberflächenspannung verantwortlich machen, selbst dann, wenn — wie wir bereits oben erwähnten — das Gleiten ein typisches ist; man braucht nämlich nur anzunehmen, daß die Oberflächen der Zellen auch typisch verschieden sind resp. typisch verschieden werden. Durch zeitliche Aenderung der Oberflächenspannungen der ganzen Zelloberfläche oder einzelner Teile derselben kann man auch das Zelltrennen und das Zellzusammenfügen zustande kommen lassen, aber gerade dieser Ausspruch zeigt, wie wenig damit eigentlich gewonnen ist, denn über die Ursachen, welche die Oberflächenspannungen örtlich und zeitlich verschiedenartig machen, wissen wir nichts. Roux betont deshalb mit Recht, daß die Flüssigkeitsmechanik allein gerade über das Typische des Geschehens in der Entwickelung der Lebewesen keine Aufklärung zu geben vermag, und es war die gleiche Einsicht, welche Driesch dazu veranlaßte, die Oberflächenspannung als „Mittel“ der Morphogenese zu bezeichnen. Ganz dieselben Beschränkungen gelten, von anderen Einwänden abgesehen, auch bei dem Versuche Dreyers, der die Form der Skelettnadeln der Radiolarien durch ihre Abscheidung in den Kanten eines Blasengefüges erklären wollte. Auch hier bleibt, wie Driesch gleich nach Aufstellen der Hypothese aussprach, die typische Zusammenfügung der Nadeln zu einem typischen Skelett unerklärt. Und daß Rhumblers Experimente mit Chloroform und Oeltropfen, die sich ein Gehäuse aus Glassplittern bauen, zur Erklärung der typischen Form einer Thalamophore allein nicht genügen, weiß Rhumbler selber. So sind wir schließlich am Ende unserer Betrachtungen noch einmal zur Kardinalfrage der ontogenetischen Entwickelung, zur Frage nach den Ursachen der örtlichen und zeitlichen Gruppierung der die Gestaltbildung ausführenden Faktoren zurückgeführt worden.

Literatur. *Lehrbücher:* **Ch. B. Davenport,** *Experimental Morphology, I und II. New York 1897 bis 1899.* — **O. Hertwig,** *Allgemeine Biologie. 4. Aufl. Jena 1912.* — **R. Höber,** *Physikalische Chemie der Zelle und der Gewebe. 3. Aufl. Leipzig 1911. (Für die Bedeutung der Salze).* — **J. W. Jenkinson,** *Experimental Embryology. Oxford 1909.* — **Korschelt und Heider,** *Lehrbuch der vergleichenden Entwickelungsgeschichte. Allgemeiner Teil. 1. Lief. Jena 1902.* — **J. Loeb,** *Vorlesungen über die Dynamik der Lebensvorgänge. Leipzig 1906. Zur Orientierung über den Loebschen Standpunkt sehr zu empfehlen.* — **O. Maas,** *Einführung in die experimentelle Entwickelungsgeschichte. Wiesbaden 1903.* — **T. H. Morgan,** *Regeneration. Deutsch v. Moszkowski. Leipzig 1907.* — **Derselbe,** *Experimentelle Zoologie. Deutsch v. L. und H. Rhumbler. Leipzig 1909.* — **H. Przibram,** *Einleitung in die experimentelle Morphologie der Tiere. Leipzig und Wien 1904.* — **Derselbe,** *Experimental-Zoologie. Ebenda 1909 bis 1910. Bis jetzt 3 Bände. Vollständiges Literaturverzeichnis. Für eingehende Studien ist dieses und das Werk von* **Korschelt und Heider** *zu empfehlen, als kürzere Uebersichten dagegen die Bücher von* **Maas** *und* **Jenkinson.**

Einige Spezialliteratur: **Th. Boveri,** *Ergebnisse über die Konstitution der chromatischen Substanz des Zellkerns. Jena 1904.* — **Derselbe,** *Zellenstudien. Heft V und VI. Jena 1905 und 1907.* — **Derselbe,** *Die Potenzen der Ascaris-Blastomeren bei abgeänderter Furchung. Festschrift für R. Hertwig, Bd. III, 1910.* — **H. Driesch,** *Die Biologie als selbständige Grundwissenschaft. 2. Aufl. Leipzig 1911.* — **Derselbe,** *Analytische Theorie der organischen Entwickelung. Leipzig 1894.* — **Derselbe,** *Die organischen Regulationen. Leipzig 1901.* — **Derselbe,** *Der Vitalismus als Geschichte und als Lehre. Leipzig 1905.* — **Derselbe,** *Die Physiologie der tierischen Form. Ergebnisse der Physiologie. 5. Jahrgang. 1906.* — **Derselbe,** *Philosophie des Organischen. 2. Bd. Leipzig 1909. Die am meisten zu empfehlende Darstellung des Drieschschen Standpunktes.* — **A. Fischel,** *Die Bedeutung der entwickelungsmechanischen Forschung für die Embryologie und Pathologie des Menschen. Leipzig 1912.* — **C. Herbst,** *Formative Reize in der tierischen Ontogenese. Leipzig 1901.* — **P. Kammerer,** *Ursprung der Geschlechtsunterschiede. Fortschritte der naturwissenschaftlichen Forschung, Bd. 5, 1912.* — **J. Loeb,** *Untersuchungen zur physiologischen Morphologie der Tiere. Würzburg 1891 und 1892.* — **Derselbe,** *Studies in General Physiology. 2 Bd. Chicago 1905.* — **Derselbe,** *Untersuchungen über künstliche Parthenogenese. Leipzig 1906.* — **Derselbe,** *Die chemische Entwickelungserregung des tierischen Eies.*

Digitized by Google

Berlin 1909. — **Derselbe,** *The rôle of salts in the preservation of life. Science N. S. Vol. 34, 1911. Wichtig für die Bedeutung der Salze. —* **W. Roux,** *Gesammelte Abhandlungen. Leipzig 1895. —* **Derselbe,** *Programm und Forschungsmethoden der Entwickelungsmechanik der Organismen. Leipzig 1897. —* **Derselbe,** *Die Entwickelungsmechanik, ein neuer Zweig der biologischen Wissenschaft. Vorträge und Aufsätze über Entwickelungsmechanik der Organismen. Heft I. Leipzig 1905. Diese Schrift ist zur Orientierung über den Rouxschen Standpunkt besonders geeignet. —* **Derselbe,** *Ueber die bei der Vererbung blastogener und somatogener Eigenschaften anzunehmenden Vorgänge. Verh. d. naturforschenden Vereins in Brünn. Bd. 49. 1911. —* **Derselbe,** *Die vier kausalen Hauptperioden der Ontogenese, sowie das doppelte Bestimmtsein der organischen Gestaltungen. Mitt. d. naturf. Ges. Halle. Bd. 1. 1911. —* **Derselbe,** *Terminologie der Entwickelungsmechanik der Tiere und Pflanzen in Verbindung mit* **Correns, Fischel** *und* **Küster,** *Leipzig 1912. —* **H. Spemann,** *Zum Problem der Correlation in der tierischen Entwickelung. Verhandl. d. deutsch. zool. Ges. 1907. —* **Derselbe,** *Zur Entwickelung des Wirbeltierauges. Zool. Jahrb., Bd. 32, Abh. für allg. Zool. und Physiol. 1912. — Im übrigen sind alle Spezialarbeiten der genannten Autoren und die von* **Braus, Conklin, Godlewski, Harrison, Maas, Morgan, Przibram, Rhumbler, zur Strassen, Wilson, Wolff** *usw. usw. mit Hilfe der zitierten Literatur und mit Drieschs „Ergebnissen der Entwickelungsphysiologie" zu finden, welche zum erstenmal 1899 und zum letztenmal 1909 in den Ergebnissen der Anatomie und Entwickelungsgeschichte von Merkel und Bonnet erschienen sind.*

Wichtigste Zeitschriften: Archiv f. Entwickelungsmechanik der Organismen, herausgegeben von W. Roux und The Journal of Experimental Zoology.

C. Herbst.

B. Entwickelungsmechanik oder Entwickelungsphysiologie der Pflanzen.

1. Von der Einleitung der Formbildung: a) Von der Befruchtung: α) Die Herstellung der Entwickelungsfähigkeit bei der normalen Befruchtung. β) Die Herstellung der Entwickelungsfähigkeit bei der Parthenogenesis. γ) Die Herstellung der Befruchtungsfähigkeit. δ) Polyspermie. b) Von der sexuellen Affinität: α) Selbstbefruchtung. β) Normalbefruchtung. γ) Bastardbefruchtung. c) Von der Geschlechtsbestimmung. 2. Von der Entwickelung des Individuums: a) Von der Beeinflussung der Gestaltung durch äußere Faktoren: α) Einfluß der Schwerkraft; Barymorphosen. β) Einfluß des Lichtes; Photomorphosen. γ) Einfluß chemischer Agentien; Chemomorphosen. δ) Einfluß des Turgeszenzzustandes; Hygromorphosen. ε) Einfluß der Temperatur; Thermomorphosen. ζ) Einfluß des Kontaktes; Thigmomorphosen. η) Einfluß von Druck und Zug; Mechanomorphosen. ϑ) Einfluß anderer Organismen. b) Von der Beeinflussung der Gestaltung durch innere Faktoren: α) Entwickelungsphysiologische Bedeutung des Aggregatzustandes des Protoplasmas. β) Die Zellteilung, ihre Ursachen und die Bestimmung ihrer Richtung. γ) Die Zellengröße, ihre Determinierung und entwickelungsphysiologische Bedeutung. δ) Die strukturelle Organisation der Zelle und ihre entwickelungsphysiologische Bedeutung; Anisotropie, Polarität. ε) Die Chromosomenzahl und ihre entwickelungsphysiologische Bedeutung. ζ) Das Alter der Zellen und Individuen und seine entwickelungsphysiologische Bedeutung. η) Die Korrelationserscheinungen. ϑ) Die Morphästhesie. 3. Von den Restitutionserscheinungen: a) Die Tatsachen der Restitution: α) Die Reparation. β) Die Regeneration. b) Die Abhängigkeit der Restitution von äußeren und inneren Faktoren: α) Die Beeinflussung der Lokalisation der Regenerate. β) Die Beeinflussung der Qualität der Regenerate. γ) Die Bedingungen der Restitution. δ) Die Auslösung der Restitution; der Restitutionsreiz.

Die Entwickelungsmechanik oder Entwickelungsphysiologie (auch experimentelle Morphologie, physiologische Morphologie, Physiologie der Formbildung genannt) ist die Lehre von den Gesetzen des Formwechsels. Sie ist ein Teil der allgemeinen Physiologie, die außerdem noch die Lehre vom Stoffwechsel und von den Bewegungen umfaßt. Ihre Aufgabe ist es, zu untersuchen, wie und unter dem Einflusse welcher innerer und äußerer Faktoren sich die Anlagen zu den dazugehörigen Merkmalen entwickeln; die Entstehung dieser Anlagen zu untersuchen ist Aufgabe der Deszendenzlehre, ihre Uebertragung von einer Generation auf die andere Aufgabe der Vererbungslehre. So umgrenzt, umfaßt die Entwickelungsphysiologie auch das Gebiet der Pathologie, das aber im folgenden nicht mit berücksichtigt ist (vgl. den Artikel „Pflanzenkrankheiten"). Die Methode der Entwickelungsphysiologie ist die experimentelle. Zusammenfassende Darstellungen, Lehr- oder Handbücher der pflanzlichen Entwickelungsphysiologie gibt es noch nicht. Doch finden sich in Pfeffers und Josts Physiologie ausführliche Behandlungen entwickelungsphysiologischer Probleme, ebenso in Göbels Einleitung in die experimentelle Morphologie (1908).

Die einzige eingehende Systematisierung der entwickelungsphysiologischen Probleme gibt Driesch (Die Biologie als selbständige Grundwissenschaft und das System der Biologie. 2. Aufl. Leipzig 1911, S. 41ff.). Die von uns befolgte Einteilung schließt sich an diese an, freilich mit starken Aenderungen. Darnach gliedert sich das Gebiet so, wie es in der vorstehenden Uebersicht angegeben ist.

1. Von der Einleitung der Formbildung. 1a) Von der Befruchtung. Die Befruchtung ist rein äußerlich betrachtet zu definieren als die Vereinigung zweier Gameten zu einer Zelle, die zum Ausgangspunkte der Entwickelung eines neuen Individuums wird.

Digitized by Google

Sie ist ein komplexer Vorgang, bei dem zwei an sich voneinander unabhängige Teilprozesse eng miteinander verknüpft erscheinen: die Verleihung der Entwickelungsfähigkeit an die Eizelle und die Uebertragung der erblichen Eigenschaften beider Eltern auf das Verschmelzungsprodukt. Das Problem der Herstellung der Entwickelungsfähigkeit fällt ganz in das Gebiet der Entwickelungsphysiologie, das der Eigenschaftsübertragung in das Gebiet der Vererbungslehre, wenn es auch zum Teil entwickelungsphysiologischer Behandlung zugänglich ist. Wir haben also hier zunächst die Frage zu behandeln, worauf es beruht, daß der an sich nicht entwickelungsfähige Gamet durch die Verschmelzung mit dem anderen entwickelungsfähig wird; daran schließt sich dann die weitere Frage, wodurch sich, abgesehen von der Gametenverschmelzung, den einzelnen Gameten etwa die Entwickelungsfähigkeit verleihen läßt (Parthenogenesis).

a) Die Herstellung der Entwickelungsfähigkeit bei der normalen Befruchtung. Die Frage, inwiefern die Gametenverschmelzung die Entwickelungsfähigkeit herstellt, läßt sich auch so formulieren: warum sind die unverschmolzenen Gameten, das unbefruchtete Ei, das einzelne Spermatozoon, das Pollenkorn usw. entwickelungsunfähig? Bei höheren Pflanzen ist es nun allerdings überhaupt noch nicht gelungen, aus einer einzelnen Zelle des Körpers ein neues Individuum aufzuziehen, obwohl die Tatsachen der Restitution die Annahme rechtfertigen, daß die Fähigkeit zur Neubildung eines ganzen Individuums den einzelnen Zellen zuzusprechen ist. Es wäre aber unzulässig, die Entwickelungsunfähigkeit der unverschmolzenen Keimzellen mit dieser Unfähigkeit isolierter Körperzellen, sich zu neuen Individuen weiter zu entwickeln, in Parallele zu setzen, da für die isolierten Körperzellen die Bedingungen des Versuches offenbar sehr ungünstig sind, und es erlaubt ist, anzunehmen, daß sie sich unter günstigeren Verhältnissen entwickeln würden. Die unbefruchtete Eizelle dagegen befindet sich im Embryosack unter sehr günstigen Entwickelungsbedingungen, es ist ja geradezu alles für ihre Weiterbildung zum Embryo vorbereitet, und es fehlt eben nur der Anstoß, der durch die Verschmelzung mit dem befruchtenden Inhalt des Pollenschlauches gegeben ist. Die Entwickelungsunfähigkeit der unbefruchteten Eizelle kann also nicht darauf beruhen, daß sie sich unter dem Einfluß äußerer Faktoren befände, die eine Entwickelung unmöglich machten. Und es ist leicht ersichtlich, daß für unverschmolzene Gameten etwa von Algen und Pilzen das gleiche gilt.

Nun unterscheiden sich bekanntlich bei den höheren Pflanzen die Keimzellen von den anderen Zellen desselben Individuums dadurch, daß sie nur halb so viel Chromosomen im Kern führen wie die somatischen Zellen; sie sind haploid, die letzteren diploid. Es finden bei der Entwickelung und Reifung der Keimzellen bestimmte Kernteilungen statt, durch die diese Reduktion der Chromosomenzahl erreicht wird. Mit ihr hat man die Entwickelungsunfähigkeit der Keimzelle in Zusammenhang gebracht und also angenommen, daß die Herstellung der Entwickelungsfähigkeit bei der Befruchtung auf der mit der Keimzellverschmelzung verbundenen Verdoppelung der Chromosomenzahl zur diploiden Anzahl beruhe (Straßburger). Aber diese Auffassung ist nicht haltbar. Denn es gibt genug Zellen, die, trotzdem sie nur die haploide Chromosomenzahl in ihren Kernen führen, entwickelungsfähig sind (Gametophyten; generativ parthenogenetische und apogame Pflanzen), und andererseits Keimzellen, die trotz des Besitzes der diploiden Chromosomenzahl entwickelungsunfähig sind (z. B. an den apospor entstandenen Moosgametophyten Marchals). Näheres darüber ist in dem Artikel „Fortpflanzung der Pflanzen" zu finden. Ob das Vorhandensein der gesamten haploiden Chromosomenzahl eine conditio sine qua non der Entwickelungsfähigkeit ist, muß noch experimentell festgestellt werden; gewisse Erwägungen und Tatsachen lassen es vermuten, daß wenigstens für die Ermöglichung einer normalen Entwickelung mindestens der haploide Chromosomensatz vorhanden sein muß. Dieser aber ist ja in jedem unverschmolzenen Gameten vorhanden.

Die Verdoppelung der Chromosomenzahl ist es also nicht, die für die Herstellung der Entwickelungsfähigkeit maßgebend ist. Ebensowenig ist es die Veränderung des relativen Mengenverhältnisses zwischen Kern- und Protoplasmasubstanz (Kernplasmarelation), wie sie mit der Befruchtung deshalb verbunden ist, weil in den meisten Fällen die männliche Keimzelle fast nur aus Kernsubstanz besteht, durch ihren Eintritt in die weibliche Keimzelle also die Kernplasmarelation zugunsten der Kernmasse verschoben wird. Denn wenn man z. B. bei Cystosira barbata von den Eiern einen erheblichen Teil absprengt, so wird durch diese Operation in dem kernhaltigen Bruchstück auch das Massenverhältnis zwischen Kern- und Plasmasubstanz zugunsten der ersteren verschoben, ohne daß aber damit die Entwickelungsfähigkeit hergestellt würde, obwohl die verkleinerten Eier noch vollständig lebens- und besamungsfähig bleiben.

Wie dem auch sei, irgend etwas muß jedenfalls durch den einen Gameten in den anderen eingeführt werden, was die bisher be-

Digitized by Google

stehende Entwickelungsunfähigkeit beseitigt. Es kann das nicht die Einfuhr eines der drei wesentlichen Grundorgane der pflanzlichen Zelle — Protoplasma, Kern, Chromatophoren — sein, da das Ei alle diese Organe und also den Wert einer vollständigen Zelle besitzt. Daher mag es wohl am wahrscheinlichsten sein, daß durch den Eintritt der männlichen Keimzelle in die weibliche innerhalb dieser irgend welche chemischen Aenderungen geschehen, die die Entwickelungshemmung beseitigen, sei es nun, daß das befruchtende Element bestimmte entwickelungserregende Substanzen mitbringt, sei es, daß zwischen den beiderseitigen Inhaltsstoffen chemische Reaktionen erfolgen, die erst die Produktion solcher Stoffe zur Folge haben, sei es, daß der entwickelungsauslösende Reiz durch Konzentrations- oder Zustandsänderungen gewisser Inhaltsbestandteile gegeben ist oder sonstwie. Vermutlich werden hierüber die Forschungen über natürliche und experimentelle Parthenogenesis weiteren Aufschluß geben.

β) Die Herstellung der Entwickelungsfähigkeit bei der Parthenogenesis (vgl. den Artikel „Fortpflanzung der Pflanzen").

γ) Die Herstellung der Befruchtungsfähigkeit. Auch über die Frage, wodurch die Befruchtungsfähigkeit der Eizelle hergestellt wird, wissen wir nichts Positives. Selbstverständlich ist, daß die Keimzellen eine ganz bestimmte morphologische Differenzierung besitzen müssen, um als solche funktionieren zu können. Doch müssen sie außerdem auch einen bestimmten physiologischen Zustand besitzen, durch den sie sich von den anderen Zellen unterscheiden. Solche Unterschiede müssen z. B. zwischen der Eizelle und den ihr benachbarten Synergiden postuliert werden, da Synergidenbefruchtung nur außerordentlich selten vorkommt; möglich, daß in diesem Falle der ganze Unterschied darauf beruht, daß im Ei bestimmte auf den Inhalt des Pollenschlauches chemotaktisch wirkende Substanzen produziert werden, in den Synergiden dagegen nicht. Sicher ist auch für die Herstellung der Befruchtungsfähigkeit die Erteilung der haploiden Chromosomenzahl an die Keimzellen nicht verantwortlich zu machen; denn es gibt zahllose haploidkernige Zellen, die wohl nicht befruchtungsfähig sind (vegetative Zellen der Gametophyten) und diploide Eizellen, die befruchtet werden können (Marchals apospor entstandene Moosgametophyten).

Die Befruchtungfähigkeit pflegt im allgemeinen nicht sehr lange erhalten zu bleiben; wenn befruchtungsreife Zellen nicht rechtzeitig befruchtet werden, so gehen sie bald zugrunde.

δ) Polyspermie. Während aus dem Tierreiche zahlreiche Beispiele normaler und pathologischer Polyspermie bekannt sind, ist eine ähnliche Ueberfruchtung bei Pflanzen nur äußerst selten beobachtet worden. Bei Ectocarpus kann gelegentlich mehr als eine männliche Zelle mit einer weiblichen verschmelzen (Berthold, Oltmanns); bei Protosiphon können drei Gameten statt nur zwei sich vereinigen (Klebs); in das Ei von Fucus können mehrere Spermatozoen eindringen (Farmer und Williams); künstlich zweikernig gemachte Zellen von Spirogyra können mit einkernigen zu einer normalen keimfähigen Zygote kopulieren (Gerassimoff); drei oder vier Zellen statt zwei können bei Melampsora Lini miteinander fusioniren (Fromme). Ueber die Bedingungen, unter denen solche Polyspermie erfolgt, sowie über ihre Folgen für die Entwickelung und Gestaltung ist ebensowenig etwas bekannt wie darüber, ob auch bei höheren Pflanzen eine analoge Ueberfruchtung möglich ist; ausgeschlossen ist sie natürlich nicht.

1b) Von der sexuellen Affinität. Ob zwei Keimzellen miteinander verschmelzen und ein entwickelungsfähiges Kopulationsprodukt liefern können, ist in hohem Maße abhängig von dem Verwandtschaftsgrad, in dem die beiden Gameten zueinander stehen. Die Frage, warum und wodurch der Verwandtschaftsgrad hier mitbestimmend ist, und ob diese sexuelle Affinität experimentell beeinflußbar ist, ist ein entwickelungsphysiologisches Problem.

Ein sicheres, für das ganze Organismenreich gültiges Maß für die Bestimmung der Verwandtschaftsverhältnisse der Geschlechtszellen gibt es freilich nicht; doch kann man (mit O. Hertwig) die zahllosen Möglichkeiten, die die sexuelle Affinität darbietet, in drei Gruppen zusammenfassen, indem man a) von Selbstbefruchtung und Inzucht, b) von Normalbefruchtung, c) von Bastardbefruchtung redet.

α) Selbstbefruchtung. Häufig, aber durchaus nicht immer, ist eine Selbstbefruchtung, d. h. die erfolgreiche Vereinigung zweier von demselben Individuum stammenden Keimzellen unmöglich. So sind z. B. bei den Algen Dasycladus, Ulothrix, Ectocarpus u. a. die zahllosen Gameten, die vom gleichen Individuum gebildet werden, absolut nicht zur Verschmelzung zu bringen (Berthold). Auch bei höheren Pflanzen sind viele Fälle von Selbststerilität bekannt, d. h. Fälle, wo trotz reichlicher Selbstbestäubung keine Befruchtung erfolgt, während dieselben Blüten bei Bestäubung mit dem Pollen anderer Individuen Samen ansetzen. Exemplare, die vegetative Teilstücke desselben Mutterstockes darstellen, bleiben auch bei Kreuzung untereinander steril (Delpino).

Digitized by Google

Die Ursachen solcher Selbststerilität können verschiedenartige sein. Bei Cytisus laburnum beruht sie z. B. darauf, daß der Pollen ohne mechanische Verletzung der Narbe auf dieser nicht keimen kann; solche Verletzungen treten bei Autogamie nicht ein, wohl aber bei Fremdbestäubung durch die den Pollen übertragenden Insekten (Jost). In anderen Fällen keimen die Pollen zwar auf der Narbe der eigenen Blüte, es wird aber das Wachstum der Pollenschläuche durch den Griffel gehemmt oder völlig sistiert (Straßburger, Jost), offenbar unter dem Einfluß bestimmter löslicher im Leitgewebe vorhandener spezifischer Individualstoffe, die in den einzelnen Individuen qualitativ verschieden sein müssen, von denen sich aber zurzeit nicht sagen läßt, ob ihre Identität in Pollenschlauch und Leitgewebe wachstumshemmend oder ob ihre Verschiedenheit wachstumsfördernd auf den Pollenschlauch wirkt (Jost). In wieder anderen Fällen mag die Selbststerilität wirklich auf mangelnder sexueller Affinität begründet sein, also auf der Unfähigkeit der beiden Keimzellen, miteinander zu verschmelzen. Worauf diese Unfähigkeit beruht, ist noch zu untersuchen, ebenso die Frage, ob durch die Einwirkung gewisser äußerer Faktoren selbststerile Pflanzen zur Selbstfertilität gebracht werden können. Nach Erfahrungen an manchen tierischen Objekten erscheint das möglich; auch gibt Fr. Müller an, daß z. B. Eschscholtzia californica und Abutilon Darwini je nach den Kulturbedingungen bald vollkommen selbststeril, bald mehr oder weniger selbstfertil sind.

Daß andererseits bei manchen Pflanzen selbst nächstverwandte Zellen miteinander sexuell kopulieren können, zeigen viele Spirogyra-Arten, bei denen nebeneinander liegende Schwesterzellen desselben Fadens miteinander zur Zygote verschmelzen. Auch bei höheren Pflanzen ist ja erfolgreiche Selbstbefruchtung weitverbreitet, und es gibt genug Arten, bei denen schon in der Knospe Selbstbestäubung stattfindet, so daß die Blüten sich niemals öffnen und noch als Knospen abfallen, wie z. B. bei Myrmecodia.

Es ist also keineswegs etwa ein allgemeines Gesetz, daß bei den Pflanzen Selbstbefruchtung unmöglich oder erschwert sei oder zu vermeiden gesucht werde. Auch sind die durch Selbstbefruchtung entstandenen Nachkommen nicht so allgemein, wie das Darwin annahm, schwächlicher konstituiert als die durch Fremdbefruchtung erzeugten. Die Fälle, in denen das trotzdem so ist, bedürfen genauer entwickelungsphysiologischer Untersuchung. Es sind verschiedene Möglichkeiten denkbar, warum Heterozygoten kräftigere und produktivere Individuen als Homozygoten darstellen können; z. B. könnte an eine stimulierende Giftwirkung der durch die Kreuzung vereinigten Plasmen aufeinander gedacht werden (Johannsen).

β) Normalbefruchtung. Normalbefruchtung ist die Verschmelzung von Keimzellen, die von verschiedenen Individuen derselben Art stammen. Zwischen solchen besteht ganz allgemein sexuelle Affinität, selbst wenn die Art in zahlreiche, oft morphologisch äußerst verschiedenartig ausgebildete Untergruppen zerfallen ist.

Doch gibt es Fälle, in denen trotz reichlicher Normalbefruchtung kein Samenansatz erfolgt. Solche Sterilität kann verschiedene Ursachen haben. Sie kann z. B. auf korrelativen Hemmungswirkungen beruhen, die von den vegetativen Teilen desselben Individuums ausgehen. So ist es eine alte Erfahrung, daß Lilium candidum normal nie Samen ansetzt, das aber tut, wenn die Blütenstengel nach der Befruchtung abgeschnitten werden. Offenbar wird hier die Samenbildung dadurch verhindert, daß die Baustoffe, die sonst zur Samenbildung verwandt werden, in die Zwiebel hinabströmen. Wieweit die Embryoentwickelung kommt, ob überhaupt noch eine Befruchtung eintritt, ob eventuell nicht schon die Keimzellbildung selbst abnorm verläuft oder unterdrückt wird, ist in diesem und in anderen Fällen korrelativer Sterilität noch zu untersuchen.

Die Sterilität kann aber auch auf dem Vorhandensein besonderer steriler Rassen beruhen. So gibt z. B. Jost an, daß er bei Cardamine pratensis, einer selbststerilen Pflanze, in Straßburg auch bei Fremdbestäubung mit Pollen von anderen Cardamine-Individuen niemals Samenansatz erzielen konnte, obwohl an anderen Orten die Pflanze fertil ist. Da Cardamine pratensis sich durch starke vegetative Vermehrungsfähigkeit auszeichnet, wäre es möglich, daß die benutzten Stöcke alle zum gleichen Individuum gehörten, also nur Selbststerilität vorläge. Doch ist es wohl wahrscheinlicher, daß wirklich sterile Rassen vorkommen, und es muß dann in jedem einzelnen Falle untersucht werden, worauf die Sterilität beruht (Mißbildung der Sexualapparate, mangelnde sexuelle Affinität usw.), und wie weit sie erblich fixiert oder direkt von äußeren Faktoren induziert ist.

Denn auch äußere Bedingungen können trotz reicher Normalbefruchtung Sterilität bewirken. Besonders Temperatur- und Ernährungsverhältnisse sind hier wirksam. Die bei so vielen Kulturpflanzen zu beobachtende Sterilität fällt zum großen Teil in dieses Kapitel. Doch liegen erst die ersten Ansätze zu einer experimentellen Behandlung der Frage vor (z. B. Wulff bei Potentilla, v. Faber bei Coffea).

γ) Bastardbefruchtung. Bei der

Digitized by Google

Bastardbefruchtung, d. h. der Verschmelzung von zwei Keimzellen, deren Erzeuger zu verschiedenen systematischen Einheiten gehören, zeigt sich die Wirksamkeit der sexuellen Affinität besonders deutlich. Im allgemeinen gilt der Satz, daß die Keimzellen von Individuen, die im System sehr weit auseinander stehen, sich nicht miteinander verbinden lassen. Doch ist damit keineswegs gesagt, daß systematisch einander nahestehende Arten sich unbedingt miteinander bastardieren ließen. Ob das möglich ist, muß von Fall zu Fall experimentell entschieden werden, und die Behauptung, daß zwei Arten sich nicht miteinander kreuzen lassen, kann nur auf Grund sehr ausgedehnter Versuche ausgesprochen werden. Denn es gibt Fälle, in denen eine Bastardierung zwischen zwei Arten unter Tausenden von Versuchen nur einmal gelingt (Ribes Gordonianum). Auch ist zu bedenken, daß oft eine Art A sich durch den Pollen einer anderen Art B erfolgreich befruchten läßt, nicht aber die Art B umgekehrt durch den Pollen von A.

Worauf es beruht, daß zwischen gewissen Arten Kreuzungen möglich sind, zwischen anderen dagegen selbst bei künstlicher Bestäubung nicht, ist meist ganz unbekannt. In vielen Fällen mag es damit zusammenhängen, daß die Pollenkörner auf der artfremden Narbe nicht keimen, ihre Schläuche in den Griffel gar nicht oder nicht weit genug eindringen können; dann ist schwer zu entscheiden, ob eine Befruchtung hier trotzdem möglich wäre. Bei Pflanzen, deren männliche Gameten als freibewegliche Spermatozoen ausgebildet sind, wird die Normalbefruchtung häufig dadurch einigermaßen garantiert und die Bastardbefruchtung ausgeschlossen, daß die Spermatozoen chemotaktisch durch spezifische Reizstoffe, die von arteigenen, nicht aber von artfremden weiblichen Pflanzen ausgeschieden werden, zu den Eiern hingeführt werden.

Beachtenswert ist, daß die Fähigkeit, miteinander sexuelle Bastarde zu liefern, nicht parallel der Fähigkeit geht, miteinander in Pfropfsymbiose zu leben und Pfropfbastarde zu bilden. Cytisus laburnum und purpureus z. B. lassen sich nicht miteinander kreuzbefruchten, haben aber zusammen den Pfropfbastard Cytisus Adami erzeugt und lassen sich sehr leicht aufeinander pfropfen.

Die Verschiedenheit der Chromosomenzahl mag manchmal ein die Bastardierung erschwerendes Moment sein; allein ausschlaggebend für die Möglichkeit oder Unmöglichkeit der Kreuzung ist sie aber nicht. Denn die Keimzellen von Cytisus purpureus und Cytisus laburnum haben beide je 24 Chromosomen, verschmelzen aber trotzdem nicht miteinander. Andererseits sind in den Kernen der Keimzellen von Drosera longifolia 20 Chromosomen vorhanden, in denen von Drosera rotundifolia nur 10; trotzdem entsteht aus ihrer Vereinigung ein entwickelungsfähiger Embryo (Rosenberg).

Es läßt sich also nichts Positives darüber aussagen, worauf das Vorhandensein oder Fehlen der sexuellen Affinität zwischen zwei Arten beruht. Die bekannten Versuche von Loeb und anderen bei Tieren weisen darauf hin, daß sie durch Außenfaktoren beeinflußbar ist. Der Entwickelungsphysiologie eröffnet sich hier ein fruchtbares Arbeitsfeld. Es wäre besonders auch für die experimentelle Vererbungsforschung sehr wichtig, wenn es gelänge, die Bedingungen genau festzustellen, unter denen zwischen zwei gegebenen Arten eine erfolgreiche Kreuzbefruchtung möglich ist, und es werden sich zweifellos durch Beseitigung gewisser Hemmungen viele Bastardierungen erzielen lassen, die jetzt als ausgeschlossen gelten.

Die Eigenschaften der Bastarde im Vergleich zu denen der Eltern zu studieren ist nicht Aufgabe der Entwickelungsphysiologie, soweit es sich um Fragen der Vererbung handelt. Doch fällt das Studium gewisser an Bastarden zu beobachtender Erscheinungen doch auch in das Gebiet der Entwickelungsphysiologie. So die Tatsache, daß sich sehr häufig, aber durchaus nicht immer Bastarde sehr viel üppiger entwickeln als die Elternarten. Das bekannteste Beispiel dafür ist wohl Ribes Gordonianum, das an Ueppigkeit des Wuchses seine beiden Eltern Ribes sanguineum und Ribes aureum weit übertrifft. Solche Fälle waren schon Kölreuter bekannt, der darin eine Kompensation für die oft bei Bastarden vorhandene völlige Sterilität erblickte. Doch hat schon Gärtner darauf hingewiesen, daß die größere Ueppigkeit bisweilen auch an ganz fruchtbaren Bastarden, z. B. denen von verschiedenen Datura-Arten zu beobachten sei. Es bleibt noch kritisch zu untersuchen, ob das Luxuriieren der Bastarde mendelistisch zu deuten oder entwickelungsphysiologisch etwa als Reizwirkung gewisser dem Bastard eigener Stoffe oder sonstwie zu verstehen ist.

Die Frage nach den Ursachen der Sterilität bei vielen Bastarden schließt sich eng an das Problem der Sterilität von Nichthybriden an. Wenigstens muß die Theorie, daß die Unfruchtbarkeit der Bastarde zusammenhänge mit einer Unverträglichkeit der verschiedenelterlichen, bei den Reifeteilungen in enge Wechselbeziehungen tretenden Chromosomen (Häcker), als stark erschüttert gelten. Es kommen wohl eher Störungen in der Kernplasmarelation, Giftwirkungen, Ernährungsunregelmäßigkeiten usw. in Betracht (Tischler). Bei der experimentellen Untersuchung

Digitized by Google

dieser Frage ist besonders zu beachten, daß gelegentlich an bisher völlig sterilen Bastarden einzelne ganz fertile Zweige oder Adventivsprosse auftreten können, so bei Anemone silvestris magellanica (Janczewski), und daß dieselben Bastardindividuen im Laufe der Jahre sprungweise fertiler werden können, wie z. B. verschiedene Sempervivum-Bastarde (Wettstein). Solche und ähnliche Tatsachen sind Hinweise darauf, daß es möglich sein wird, die Frage nach den Ursachen der Bastard-Sterilität auf entwickelungsphysiologischem Wege ihrer Lösung näher zu bringen.

1c) Von der Geschlechtsbestimmung (vgl. hierüber die Artikel „Geschlechtsverteilung" und „Geschlechtsbestimmung").

2. Von der Entwickelung des Individuums. 2a) Von der Beeinflussung der Gestaltung durch äußere Faktoren. α) Einfluß der Schwerkraft; Barymorphosen. Die Schwerkraft ist für den Habitus der Pflanzen zunächst insofern sehr bedeutungsvoll, als die Art der geotropischen Empfindlichkeit maßgebend ist für die Richtung der Zweige und Wurzeln; darnach also entscheidet es sich, ob eine Pflanze vertikal nach aufwärts wächst oder sich windet oder horizontal am Boden hinkriecht. Auch die ganze Ausbildung der Baumkrone ist mitbedingt durch die verschiedene geotropische Empfindlichkeit der Hauptachse und der Seitenzweige niederer und höherer Ordnung; im extremen Falle wächst der Hauptstamm vertikal, während die Seitenzweige horizontal von ihr abstehen: dann ergibt sich der regelmäßige Wuchs etwa von Araucaria excelsa; umgekehrt kann die Wachstumsrichtung der Seitenzweige annähernd parallel zu der der Hauptachse verlaufen: dann kommt der sogenannte Pyramidenwuchs zustande (Pappel); dazwischen sind alle denkbaren Mittelstufen verwirklicht.

Ferner kann die Schwerkraft die Anlage und das Austreiben von Seitenknospen auf der Oberseite der Triebe, von Seitenwurzeln auf der Unterseite von Stengeln und Wurzeln begünstigen (Vöchting). Doch wirkt hier viel stärker die inhärente und von der Schwerkraft unabhängige Polarität der betreffenden Pflanzenteile (vgl. S. 653ff). Dasselbe gilt im allgemeinen von der Dorsiventralität, die meistens inhärent ist, also unabhängig von einseitig wirkenden Außenfaktoren zustande kommt. Wo sie sich als beeinflußbar oder abhängig von solchen erweist, pflegt das Licht eine wichtigere Rolle als die Schwerkraft zu spielen. Doch kann in manchen Fällen auch diese allein die Ausbildung von an sich radiär angelegten Knospen zu dorsiventralen Zweigen bewirken, so z. B. bei den Laubknospen von Taxus baccata (Frank). Sogar die Zygomorphie der Blüten kann durch die einseitige Wirkung der Schwerkraft bedingt sein: die an sich radiär angelegten Blüten von Hemerocallis fulva und Epilobium angustifolium z. B. erlangen ihre dorsiventrale Ausbildung erst unter der orientierenden Reizwirkung der Schwerkraft, während bei Amaryllis formosissima u. a. die Dorsiventralität zwar inhärent ist, aber je nach der Angriffsrichtung des Schwerkraftreizes gesteigert oder abgeschwächt werden kann (Vöchting).

Aehnlich liegen die Verhältnisse bei der Anisophyllie, die bei manchen Pflanzen durch die einseitige Einwirkung der Schwerkraft auf die horizontal oder geneigt abzweigenden Seitensprosse hervorgerufen wird, so bei Tsuga canadensis (Frank), Acer platanoides (Nordhausen), Aesculus hippocastanum (Figdor, in dessen Monographie der Anisophyllie, Leipzig und Wien 1909, sich zahlreiche weitere Beispiele finden).

Endlich sei noch erwähnt, daß auch die Ausbildung der Gewebe sich bei einseitiger Einwirkung der Schwerkraft ungleich vollziehen kann. Ausgewachsene Zweige, in geneigte Lage gebracht und längere Zeit darin festgehalten, bilden Kollenchym, Sklerenchym und Xylem auf der physikalischen Oberseite englumig und dickwandig, auf der Unterseite weitlumig und dünnwandig aus (Bücher, Wortmann). Bei den Nadelbäumen und einigen Laubbäumen erfolgt in den Seitenästen das sekundäre Dickenwachstum auf der Unterseite stärker als auf der Oberseite (Hypotrophie), bei den meisten dikotylen Bäumen ist es umgekehrt die Oberseite, die gefördert erscheint (Epitrophie). Es ist aber nicht sicher, ob bei der Verursachung dieser Exzentrizität des Dickenwachstums allein die Schwerkraft beteiligt ist; es könnten auch Druck- und Zugspannungen und andere Faktoren mitwirken.

2b) Einfluß des Lichtes; Photomorphosen. Dem Lichte als einem der wichtigsten Faktoren des Pflanzenlebens kommt auch eine sehr wesentliche Rolle beim Zustandekommen der Pflanzengestaltung zu.

Das spricht sich zunächst darin aus, daß die Pflanze je nach der Intensität des Lichtes, in dessen Genusse sie steht, einen verschiedenen Habitus annimmt; das Extrem wird natürlich erreicht bei gänzlicher Abwesenheit des Lichtes (Etiolement). Dauernd ohne Licht gedeihen können ja nur Schmarotzergewächse und Saprophyten (heterotrophe Pflanzen), während autotrophe Gewächse nur so lange im Dunkeln wachsen können, als ihr Vorrat an Reservestoffen ausreicht oder ihnen — bei partieller Verdunkelung — Nährmaterial von den belichteten Teilen zugeführt wird. Selbst aber wenn das in reichem Maße der Fall ist, pflegt die Gestal-

Digitized by Google

tung der etiolierten Pflanze vom normalen Lichthabitus erheblich abzuweichen. Im allgemeinen dadurch, daß die Blätter, die ja ihre assimilatorische Funktion im Dunkeln nicht ausüben können, klein und rudimentär bleiben, während die Internodien (und oft auch die Blattstiele) eine starke Ueberverlängerung erfahren, was besonders auffällig bei manchen Rosettenpflanzen, z. B. Sempervivum-Arten wird: bei diesen beruht die Rosettenbildung darauf, daß die Internodien gestaucht bleiben infolge des wachstumhemmenden Einflusses des Lichtes; fällt dieser weg, so löst die Rosette sich auf, und die Pflanze bekommt einen ihr normalerweise ganz fehlenden Stengel mit gestreckten Internodien. Uebrigens ist zur Auslösung des Etiolements oft nicht völlige Dunkelheit nötig, es genügt unter Umständen schon eine erhebliche Verminderung des normalen Lichtgenusses. Wirksam sind dabei vor allem die roten und gelben Lichtfarben: im allgemeinen etiolieren Pflanzen im blauen und violetten Lichte kaum merklich, erleiden aber im roten und gelben Lichte fast dieselben Formveränderungen wie in der Dunkelheit.

Ueber die Ursachen des Etiolements ist nichts Positives bekannt. Sicher ist nur, daß die mit der Verdunkelung verbundene Verhinderung der Kohlensäureassimilation nicht die Ursache der Vergeilung sein kann. Denn am Lichte, aber in kohlensäurefreiem Raume kultivierte grüne Pflanzen etiolieren nicht; auch fallen die assimilatorisch wirksamsten Lichtfarben nicht mit den für den Eintritt des Etiolements maßgebenden zusammen; endlich etiolieren auch chlorophyllfreie Pilze, wie z. B. der auf Mist gedeihende Coprinus stercorarius, bei dem im Dunkeln der Hut ganz klein bleibt, während der Stiel sich übermäßig verlängert (Brefeld). Auch andere mit der Lichtintensität wechselnde Faktoren, wie die Größe der Transpiration u. a., können nur nebenher in Betracht kommen. So bleibt nur die Annahme einer Reizwirkung des Lichtes: das Längenwachstum des Stengels wird durch das Licht gehemmt, das Flächenwachstum der Blätter und der blattartig entwickelten Sprosse (Opuntia, Genista sagittalis) wird dagegen durch das Licht gefördert. Das gilt aber nur bis zu einem gewissen Intensitätsgrade des Lichtes, sehr intensives Licht hemmt wieder das Flächenwachstum, woraus es sich z. B. erklärt, daß bei manchen Pflanzen (Buche) die im Inneren der Krone befindlichen Schattenblätter eine größere Spreite besitzen als die Sonnenblätter. Auf dem hemmenden Einfluß des Lichtes auf das Längenwachstum des Stengels beruht zum großen Teil der rosettenförmige Wuchs so vieler Alpenpflanzen, die ja im Genusse eines viel intensiveren Lichtes als die Gewächse des Tieflandes stehen.

Wenn in den Erscheinungen des Etiolements vor allem eine Reizwirkung des Lichtes auf die Quantität des Wachstums zum Ausdruck kommt, so kann dieses andererseits auch die Qualität der Gestaltung beeinflussen. Wir müssen dabei unterscheiden zwischen den Wirkungen von Licht verschiedener Intensität, und den Wirkungen einseitigen Lichteinfalls.

Der Einfluß verschiedener Lichtintensität auf die Gestaltung zeigt sich vor allem darin, daß das Auftreten bestimmter Organe an eine bestimmte Lichtintensität gebunden erscheint. Das gilt besonders von den Fortpflanzungsorganen, die bei vielen Pflanzen im Dunkeln oder bei schwacher Beleuchtung überhaupt nicht zur Anlage oder zur vollen Ausbildung kommen. Coprinus niveus und nycthemerus (Brefeld), Xylaria hypoxylon, Lentinus lepideus (Freeman) und viele andere Pilze bilden bei Lichtmangel überhaupt keine Fruchtkörper; Pilobolus microsporus bleibt im Dunkeln sporangienlos, doch genügt eine vorübergehende Belichtung von wenigen Stunden, um ihn zur Anlage und Fortbildung des Sporangiums zu veranlassen (Graentz). Bei den Algen Vaucheria clavata, Oedogonium capillare u. a. treten bei geringer Lichtintensität zwar Zoosporen, aber keine Sexualorgane auf (Klebs). Auch an den Prothallien der Farne erscheint die Entstehung der Geschlechtsorgane an höhere Lichtintensitäten gebunden, und auch bei vielen (aber nicht bei allen) Blütenpflanzen werden in schwacher Beleuchtung oder im Dunkeln Blüten nur spärlich, unvollkommen oder auch gar nicht ausgebildet (Sachs, Vöchting). Das mag in manchen Fällen auf eine Abhängigkeit der Blütenbildung von der photosynthetischen Nahrungsbereitung hindeuten; auch korrelative Beziehungen zu den sich entwickelnden vegetativen Teilen sind zu berücksichtigen; doch liegt in einigen Fällen wohl sicher eine Reizwirkung des Lichtes vor. Bei manchen Pflanzen wird nicht die Blütenbildung als solche im schwachen Lichte unterdrückt, sondern es treten an Stelle der chasmogamen Blüten kleistogame auf (Vöchting); nach Göbel ist Kleistogamie im allgemeinen bedingt durch unzureichende Ernährung, würde also im vorliegenden Falle nicht als direkte Lichtwirkung, sondern als Folge der abgeschwächten Assimilationstätigkeit aufzufassen sein. Dafür spricht auch, daß Stellaria media offene Blüten bei einer Lichtintensität, bei der sonst nur kleistogame entstehen, hervorbringt, wenn sie aseptisch mit Glykose ernährt wird (Molliard). Wenn, wie das bei vielen Pflan-

Digitized by Google

zen der Fall ist, die blütentragenden Zweige anders gestaltet sind als die vegetativen, so führt diese Abhängigkeit des blühreifen und des vegetativen Wachstums von verschiedenen Lichtintensitäten dazu, daß Individuen derselben Art an Standorten, wo ihr Lichtgenuß verschieden ist, sehr verschiedenen Habitus annehmen, wie z. B. der Epheu zeigt, der im Waldesinneren nur zweizeilig beblätterte sterile Triebe besitzt, an hellen Stellen aber radiäre Zweige mit anders geformten Blättern und mit Infloreszenzen ausbildet.

Bei solchen Pflanzen, bei denen die Organbildung in der Jugend eine andere ist, als später (heteroblastische Pflanzen), pflegt die Jugendform bei einer geringeren Lichtintensität aufzutreten als die Folgeform. So entwickelt der Vorkeim der Alge Batrachospermum nur bei reichlichem Lichtzutritt die Bratachospermum-Pflanze; bei schwachem Lichte bleibt die Pflanze auf der niedrigen Stufe der Organbildung, der Chantransia-Form, stehen und der Vorkeim erreicht eine üppige Entwickelung (Göbel). Laubmoose bringen es bei mäßiger Beleuchtung nicht über die Protonema-Bildung hinaus; das Protonema entwickelt sich unbegrenzt lange als solches weiter, wenn die Lichtintensität immer unterhalb der Höhe bleibt, bei der die Entstehung von Knospen beblätterter Moosstämmchen erfolgen kann. Unter den höheren Pflanzen liefert Campanula rotundifolia ein schlagendes hierher gehöriges Beispiel: die Keimpflanze bildet nach den Kotyledonen eine Anzahl langgestielter runder Blätter, später treten nur noch lange spitzlanzettliche auf. Wenn man aber die Pflanze bei geringer Lichtintensität weiterkultiviert, dann sind auch die später entstehenden Blätter spitz (Göbel). Die unterirdischen Ausläufer und Rhizome tragen fast immer nur kurze schuppenförmige Niederblätter im Gegensatz zu den laubblattbesetzten oberirdischen Stengeln; in vielen Fällen liegt hier eine direkte Photomorphose vor, und man kann also die Ausläufer durch Belichtung zur Laubblattbildung, die grünen Stengel durch Verdunkelung zur Bildung von Schuppenblättern veranlassen (Thomas). Dabei kann sich die Gestaltung des ganzen Sprosses wesentlich verändern, wie z. B. bei der Kartoffel, deren Knollen im allgemeinen nur im Dunkeln entstehen: man kann hier durch Lichtentzug selbst an der Spitze der Laubtriebe Knollenbildung erzwingen (Vöchting). Eine noch weiter gehende Abhängigkeit der Qualität des Zuwachses von der Lichtintensität findet sich bei manchen Meeresalgen (Bryopsis plumosa u. a.), deren Sproßscheitel bei Lichtmangel zum Wurzelfaden umgewandelt wird, während Rhizoiden bei intensiver Beleuchtung den Charakter von Sprossen annehmen (Noll, Winkler).

Auch auf die innere Differenzierung der Gewebe hat die Lichtintensität erheblichen Einfluß, im allgemeinen in dem Sinne, daß bei geringer Lichtstärke die Gewebedifferenzierung nicht so weit fortschreitet wie bei stärkerer. So ist die anatomische Struktur etiolierter Pflanzen einfacher als die belichteter, wobei freilich zu beachten ist, daß als wirkende Faktoren nicht allein der Lichtmangel, sondern auch die Herabsetzung der Transpiration usw. in Betracht kommen können. Das spricht sich besonders deutlich im Bau der Sonnen- und Schattenblätter aus; die in voller Besonnung erwachsenen Laubblätter, der Buche z. B., besitzen eine Epidermis, deren Zellen höher, stärker verdickt und kräftiger kutikularisiert sind als die der Epidermis von Schattenblättern; vor allem aber ist bei letzteren das Palisadenparenchym viel schwächer ausgebildet als bei den ersteren (Stahl, Kny). Dabei verdient besonderes Interesse die Feststellung, daß diese anatomischen Verschiedenheiten nicht ausschließlich durch den unmittelbaren Einfluß der verschiedenen Lichtintensität auf das jeweils sich entwickelnde Blatt hervorgerufen werden, sondern dass stark mitwirkt der Grad der Belichtung, dem der Mutterzweig im vorhergegangenen Jahre ausgesetzt war (Nordhausen).

Die photomorphotischen Wirkungen einseitigen Lichteinfalles, also ungleich intensiver Beleuchtung verschiedener Stellen der Pflanze, zeigen sich zunächst bei der Induktion polarer Differenzierung. Oft nämlich, aber keineswegs immer entscheidet bei polar differenzierten Gewächsen die Lichtrichtung, was zum Sproßpol, und was zum Wurzelpol werden soll. Dafür ist bei vielen niederen Pflanzen die erste Teilung der keimenden Spore oder des keimenden Eies maßgebend, da dabei eine Wurzelzelle von einer Sproßzelle abgegliedert wird. Es stellt sich nun z. B. bei Equisetum bei einseitigem Lichteinfall die erste Teilungswand so, daß die Wurzelzelle an die Schattenseite, die Prothalliumzelle an die Lichtseite zu liegen kommt (Stahl). Gleiches gilt von der Braunalge Cystosira barbata, bei der die Feststellung Interesse verdient, daß eine vierstündige Dauer der einseitigen Beleuchtung schon genügt, die Teilungsrichtung ein für allemal festzulegen, obwohl die Teilung selbst erst viele Stunden später vor sich geht (Winkler).

Vielfach wirkt einseitiger Lichteinfall bestimmend auf die Verzweigung und die Entstehung von Seitenknospen und Wurzeln. So erfolgt an Moosprotonemen die Entstehung von Seitenzweigen an der stärker belichteten Seite (Sachs), und auch Fäden der Alge

Digitized by Google

Stigeoclonium verzweigen sich einseitig nach der Lichtseite (Klebs). An den Sprossen des Efeu bilden sich die bekannten kurzen Haftwurzeln immer nur auf der Schattenseite, und gleiches gilt hinsichtlich der Adventivwurzelbildung von zahlreichen anderen Pflanzen. Oft wird zwar nicht die Entstehung, aber das Austreiben von Organen auf der Lichtseite gefördert oder gehemmt. So begünstigt das Licht die Entfaltung der Knospen auf der Zweigoberseite bei Weiden, während bei den mehr aufrecht wachsenden und daher von unten stärker beleuchteten Trieben der Pappel Knospen vorzugsweise auf der Zweigunterseite austreiben (Wiesner). All das hat natürlich große Bedeutung für den Habitus der einzelnen Pflanze.

Die weitestgehenden Photomorphosen finden sich bei der Induktion der Dorsiventralität, d. h. der Ausbildung einer deutlich verschiedenen Gestaltung der Ober- und Unterseite. Sehr häufig entscheidet der einseitige Lichteinfall, welche Seite zur Oberseite und welche zur Unterseite werden soll. So wird z. B. bei den Brutkörpern und Keimscheiben des Lebermooses Marchantia polymorpha, das sehr große Strukturverschiedenheiten an den beiden Seiten des Thallus aufweist, durch eine 2 bis 3 Tage währende einseitige Einwirkung hellen Lichtes bestimmt, daß die der Lichtquelle zugewendete Seite zur Oberseite wird. Obwohl nach Ablauf dieser Frist die Dorsiventralität noch gar nicht sichtbar ausgeprägt ist, ist sie doch unwiderruflich festgelegt, da sie sich durch spätere Beleuchtung von der anderen Seite nicht mehr umkehren läßt (Pfeffer, Zimmermann). An Farnprothallien entstehen die Archegonien, Antheridien und Rhizoiden immer nur an der weniger stark belichteten Seite; hier aber läßt sich durch Umkehrung der Lichtrichtung die Dorsiventralität an dem Neuzuwachs umkehren (Leitgeb). Auch die Dorsiventralität vieler Laubmoose ist eine Folge einseitiger Lichtwirkung; dabei behalten manche Arten sehr zähe ihre ursprünglichen Symmetrieverhältnisse bei Beleuchtungsänderungen oder Verdunkelung bei, während sie bei anderen sehr leicht zu verändern sind (Němec). Von höheren Pflanzen seien die mit schuppenförmigen, zum großen Teil mit der Sproßachse verschmolzenen Cupressineen (Thuya, Thuyopsis u. a.) genannt, deren Zweige ähnlich dorsiventral wie ein Laubblatt ausgebildet sind: nur oben findet sich Palisadenparenchym, während nur unten Spaltöffnungen vorkommen. Wie Frank gezeigt hat, ist auch dafür die Lichtrichtung maßgebend, indem immer die Schattenseite spaltöffnungsführend wird, und auch hier läßt sich die dorsiventrale Struktur nach entsprechender Veränderung der Lichtrichtung umkehren. Endlich sei erwähnt, daß auch die Anisophyllie photomorphotisch bedingt sein kann, so bei Centradenia floribunda und anderen Melastomaceen, bei Gesneraceen, Acanthaceen usw. (Figdor).

γ) Einfluß chemischer Agentien; Chemomorphosen. Von chemischen Agentien, die einen Einfluß auf die Gestaltung der Pflanzen haben können, kommen natürlich in erster Linie die Nährstoffe in Betracht. Da alles Wachstum und alle Organbildung vom Vorhandensein und der Aufnahme genügenden Nährmateriales abhängt, kann man ganz allgemein mit Pfeffer die ganze Entwickelung und Gestaltung des Organismus als eine Chemomorphose bezeichnen. Demgemäß beeinflußt sowohl die verschiedene Quantität der zur Verfügung stehenden Nahrung als ihre qualitative Zusammensetzung den Habitus der Pflanzen.

Ist Nahrung in ungenügender Menge vorhanden, was an manchen Standorten ja auch in der Natur der Fall ist, so tritt kümmerliches Gedeihen ein, es entstehen Hungerformen und Zwerge (Nanismus), die durchaus nicht immer nur ein proportional verkleinertes Abbild der normal ernährten Pflanze darstellen, sondern morphologische und anatomische Besonderheiten aufweisen (Gauchery, Kraus). Oft tritt dabei vorzeitige Blütenbildung ein. Im umgekehrten Falle, bei Nahrungsüberschuß, kann Riesenwuchs (Gigantismus) eintreten, wobei infolge korrelativer Einwirkung der üppigen vegetativen Entwickelung die Blütenbildung ganz unterbleiben kann. So erzeugter Riesenwuchs oder Zwergwuchs ist aber immer nur direkt bewirkt und verschwindet wieder, wenn die nächste Generation unter normalen Verhältnissen kultiviert wird, was insofern wichtig festzustellen ist, als es bei manchen Pflanzen auch erbliche Zwerg- oder Riesenrassen gibt. Das gilt nicht nur für höhere, sondern auch für niedere Pflanzen; so ist bei Meeresalgen zu beobachten, daß manche Ostseeformen in ihrer Ausbildung gegen Nordseealgen zurückstehen, was wohl als Einfluß des geringeren Salzgehaltes der Ostsee aufzufassen ist (Reinke, Oltmanns). Freilich ist hier wie in vielen anderen Fällen vermeintlicher Chemomorphose nicht leicht zu entscheiden, inwieweit die geringere Nährstoffmenge als solche oder die damit geänderten osmotischen Verhältnisse des Mediums als gestaltbildende Faktoren in Betracht kommen.

Was die chemomorphotische Wirkung einzelner Substanzen anbelangt, so sind in erster Linie die notwendigen Elemente K, Fe, Ca, Mg, S, P, N zu erwähnen. Fehlen sie ganz, so ist alles Gedeihen unmöglich;

Digitized by Google

wenn sie aber nur spurenweise oder in sehr geringen Quantitäten zur Verfügung stehen, so erfolgt das kümmernde Wachstum vielfach in vom Normalen abweichender Form, ist also auch Gegenstand entwickelungsphysiologischer Untersuchung. So bewirkt z. B. Stickstoffmangel an Wurzeln und Internodien Ueberverlängerung wie das Licht-Etiolement (Noll). Die Alge Cosmarium punctulatum bildet bestachelte Zygoten, wenn die Nährlösung nitrathaltig, aber phosphatfrei ist, unbestachelte dagegen in stickstofffreiem Medium (Comère). — In der Asche aller Pflanzen finden sich nun aber neben den Salzen der notwendigen Elemente stets zahlreiche andere, die aus dem Boden aufgenommen werden ohne absolut zum Gedeihen notwendig zu sein. Diesen kommt keine chemomorphotische Wirkung zu, da, soweit die Erfahrungen reichen, keine Pflanze morphologische Aenderungen zeigt, wenn ihr nur die notwendigen Elemente zur Verfügung stehen. Anders lautende Angaben, wonach das Vorhandensein bestimmter Stoffe im Boden die Ausbildung besonderer morphologisch abweichender Formen zur Folge haben solle (Zinkpflanzen, Serpentinpflanzen), haben sich als irrtümlich herausgestellt.

Bei Pflanzen, die wie die Pilze und viele Algen, organische Nahrung von außen aufnehmen, erweist sich die Gestaltung oft als weitgehend abhängig von deren Qualität. Der Pilz Basidiobolus ranarum bildet in einer Nährlösung, die als organisches Nährmaterial Zucker und Pepton enthält, verzweigte durch senkrecht zur Längsachse stehende Wände gegliederte Hyphen; in einer Lösung aber, die neben Zucker anstatt Pepton Ammoniak oder Amine enthält, bildet er abgerundete sehr viel dickwandigere Zellen, die sich unregelmäßig nach allen Richtungen des Raumes verzweigen (Raciborski). Verschiedene Mucoraceen bilden an Stelle des normalen dünnen vielverzweigten Mycels hefeähnliche Sprossungen in sauerstofffreiem Medium und enorm große Riesenzellen in zuckerhaltigen Lösungen mit anorganischen Ammonsalzen als Stickstoffquelle und geringen Mengen organischer Säuren (Klebs, Ritter). Saprolegnia wächst sehr gut in Pepton und Fleischextrakt, erzeugt darin aber keine Fortpflanzungsorgane; diese entstehen reichlich bei Gegenwart von Leucin, Glutamin und viel Phosphat (Klebs). Manche an sich unverzweigte Grünalgen, wie Spirogyra, Mougeotia u. a. lassen, wenn sich in der sie umspülenden Flüssigkeit gewisse Substanzen gelöst finden (Zucker, Sublimat in großer Verdünnung, Leuchtgas in Spuren) Rhizoiden entstehen (Migula, Borge, Woycicki). Stigeoclonium nimmt je nach der chemischen Zusammensetzung des Mediums Faden- oder Palmellaform an (Livingston). Conferva wird im Dunkeln durch 1% Lösungen von Inulin zur Bildung von Zoosporen angeregt, nicht aber durch Trauben- oder Rohrzucker (Klebs). Wahrscheinlich entstehen auch die Kopulationsschläuche bei Spirogyra und anderen Konjugaten unter dem Einflusse eines von dem benachbarten Algenfaden ausgehenden chemischen Reizes, und ein solcher ist es offenbar auch, der es bewirkt, daß neben einem Stückchen Fucus-Thallus keimende Fucus-Eier die Rhizoidanlage stets auf der Seite des Eies bilden, die dem Thallusstücke zugewandt ist (Kniep).

Sehr interessante Chemomorphosen haben sich bei den Abblühvorgängen und der Umwandlung der Blüte zur Frucht feststellen lassen (Fitting). Bei gewissen Orchideen lassen sich aus den ungekeimten Pollinien chemische Stoffe extrahieren, die eine ganze Anzahl der auf die Bestäubung folgenden Umbildungen der Blütenteile auslösen; es müssen also manche der infolge der Bestäubung eintretenden Veränderungen der Blüte und speziell des Fruchtknotens als Chemomorphosen angesehen werden, die durch Sekrete des Pollens und der Pollenschläuche ausgelöst werden.

Als Chemomorphosen sehr komplizierter Art sind wohl auch die meisten Gallenbildungen aufzufassen. Nach der am besten begründeten, wenn auch noch nicht erwiesenen Theorie über die Entstehung der Gallen sind es gewisse, vom Muttertier der Gallenlarve oder von dem sich entwickelnden Ei des Gallenbildners ausgeschiedene chemische Substanzen, unter deren chemomorphotischer Einwirkung das Pflanzengewebe den abnormen Entwickelungsgang einschlägt (vgl. den Artikel „Gallen").

Offenbar spielen nun Chemomorphosen einfacherer und komplizierterer Art bei der Gestaltung der höheren Pflanzen eine große Rolle; Schwankungen in der Quantität der Nahrungszufuhr zu bestimmten Punkten und Organen, Veränderungen in der Nährstoffmischung, die Produktion bestimmter Stoffwechselprodukte, spezifischer Enzyme und Reizstoffe und dergleichen mögen für die Auslösung gewisser Gestaltungsvorgänge maßgebend sein. Wir haben in dieses naturgemäß sehr komplizierte Getriebe aber noch gar keinen Einblick. Es ist eine neuerdings besonders von Göbel und Klebs im Anschluß an Sachs vertretene Hypothese, daß die Gestaltung der Pflanze in der Hauptsache abhängig sei von den Stoffwechselvorgängen, und es wird demgemäß versucht, den Einfluß äußerer Faktoren auf die Organbildung als die Folge einer entsprechenden Beeinflussung der Stoffwechselvorgänge durch die Außenfaktoren aufzufassen. So beruht z. B. nach Göbel die Verschiedenheit

Digitized by Google

der Organbildung in den ersten und in den späteren Monaten bei einjährigen Pflanzen darauf, daß im Anfange der Entwickelung die Aufnahme von Wasser und von Aschebestandteilen überwiegt, während erst später eine größere Anhäufung organischer Substanzen eintritt, die insbesondere die Bedingung der Blütenbildung darstellt. Besonders von Klebs wird die Hypothese verteidigt, daß die Blütenbildung bei den höheren Gewächsen dadurch bedingt werde, daß das Konzentrationsverhältnis zwischen gewissen organischen Inhaltsbestandteilen der Zelle, besonders den Kohlenhydraten, und den anorganischen Salzen zu gunsten der ersteren verändert werde. Dann wäre also die fördernde Wirkung, die helles Licht für die Blütenbildung mancher Pflanzen besitzt, nicht als eigentliche Photomorphose anzusehen sein, sondern als Chemomorphose in dem gekennzeichneten Sinne, insofern Belichtung die Assimilation fördert. Eine sichere Entscheidung, ob diese Auffassungsweise berechtigt ist, läßt sich auf Grund des bis jetzt vorliegenden Tatsachenmaterials noch nicht fällen. Hier ist ein weites Feld für künftige entwickelungsphysiologische Forschung offen.

δ) Einfluß des Turgeszenzzustandes; Hygromorphosen. Alles Wachstum und also alle Gestaltung ist in hohem Maße abhängig vom Wassergehalte, der den Quellungs- und Turgeszenzzustand und damit die Elastizitäts- und Druckverhältnisse der Pflanzen beeinflußt. Ohne Wasser hört wie jede Lebenstätigkeit so auch das Wachstum völlig auf. Ein gewisses Minimum von Wasser muß also unbedingt vorhanden sein; es liegt für die einzelnen Arten verschieden hoch: Wüsten- und Steppenpflanzen gedeihen im allgemeinen bei einem geringeren Feuchtigkeitsgehalt von Boden und Luft als die Bewohner der immerfeuchten Tropenwälder. Oberhalb des erforderlichen Minimums kann der Wassergehalt der Umgebung ziemlich stark schwanken unbeschadet eines gedeihlichen Wachstums; doch pflegen sich diese Schwankungen in der Gestaltung der Pflanzen widerzuspiegeln. Sie sind auch für submers vegetierende Organismen möglich, da bei diesen der Grad der Wasseraufnahme aus dem Medium in hohem Maße abhängig ist von dessen Salzgehalt: je konzentrierter die einen Organismus umspülende Lösung ist, um so erschwerter ist für ihn im allgemeinen die Wasseraufnahme. Bei den höheren auf dem Lande wachsenden Pflanzen ist für den Grad der Wasseraufnahme nicht allein der Wassergehalt des Bodens maßgebend, sondern auch der Feuchtigkeitsgehalt der Luft und die Intensität des Luftwechsels (Wind), da davon die Wasserabgabe abhängt, die natürlich auf eine Verminderung des Turgeszenzzustandes hinarbeitet.

Bei vielen Algen sind Hygromorphosen infolge von Schwankungen des Salzgehaltes im umgebenden Medium beobachtet worden. Manche Süßwasseralgen vermögen noch zu gedeihen, wenn dem Wasser erhebliche Mengen von Chlornatrium beigemengt werden: es tritt dann eine mit der Verstärkung der Salzlösung parallel gehende Vergrößerung der Zellen ein (Oscillaria, Anabaena, Zygnema) (A. Richter). Stichococcus bacillaris bildet, in schwacher (etwa 2%) Zuckerlösung gehalten, kurze Zellen, die 2 bis 4 mal so lang als dick sind, in starker (etwa 20%) Zuckerlösung aber fadenförmig gestreckte, oft gekrümmte Zellen, die 10 bis 12 mal so lang als dick sind (Artari). Für solche und ähnliche Beeinflussungen ist, wie Livingston für Stigeoclonium nachgewiesen hat, nicht die chemische Zusammensetzung, sondern der osmotische Druck des Mediums maßgebend (siehe den Artikel „Zellphysiologie"); es wurde aber schon oben (S. 612) darauf hingewiesen, daß es in vielen hierhergehörigen Fällen schwer ist, die Wirksamkeit der beiden erwähnten Faktoren genau voneinander zu trennen. — Oft wird durch Aenderung des Salzgehaltes der Uebergang vom vegetativen Zustand zur Erzeugung von Fortpflanzungsorganen induziert. Vaucheria, Hydrodictyon, Protosiphon und andere Grünalgen lassen sich mit Sicherheit zur Zoosporenbildung bringen, wenn sie aus konzentrierteren Nährlösungen in verdünntere übertragen werden; wenn man z. B. Vaucheria repens aus einer 1% Nährlösung in eine 0,2% von gleicher chemischer Zusammensetzung versetzt, so bildet sie unter sonst gleichen Bedingungen lebhaft Zoosporen, und wenn der Prozeß in dieser Lösung zu Ende gekommen ist, so kann er durch Uebertragung in eine 0,05% Lösung wieder angefacht werden (Klebs). Doch läßt sich der gleiche Erfolg unter Umständen, vor allem bei gleichzeitiger Einwirkung hellen Lichtes, auch durch eine Erhöhung der Konzentration im Außenmedium erzielen, so daß wohl keine reine Hygromorphose vorliegt.

Aehnlich wie die Algen verhalten sich die Pilze. Basidiobolus ranarum bildet, in 10% Glycerinlösung bei hoher Temperatur (30° C) gezogen, Riesenzellen mit 2 bis 20 Kernen, die durch Unterdrückung der Zellteilung entstehen (Raciborski). Mucor racemosus, dessen Mycel an sich unseptiert ist, bildet Querwände in den Hyphen, wenn er in Lösungen hoher Konzentration (Zucker, Glycerin oder Salpeter) kultiviert wird (Klebs). Eurotium repens kann seine Conidien auf verdünnten Zuckerlösungen (z. B. 1 bis 2% Traubenzucker) nicht normal ausbilden, sondern erst auf konzentrierten (z. B. 15%); daß hier die Steigerung des osmotischen Druckes das auslösende Moment ist,

Digitized by Google

geht daraus hervor, daß man den Pilz auch auf der verdünnten Zuckerlösung zur Conidienbildung veranlassen kann, wenn man ihr osmotisch wirksame Salze, etwa Chlornatrium in geeigneten Mengen hinzufügt (Klebs). Saprolegnia erzeugt Zoosporen und Oosporen nur in Zuckerlösungen unter 5%, in Salpeterlösungen unter 0,5%, obwohl sie in erheblich konzentrierteren Lösungen der erwähnten Stoffe noch gut wachsen kann (Klebs). Daß auch an der Luft lebende Pilze entsprechende Hygromorphosen aufweisen, geht daraus hervor, daß Puccinia Asparagi in trockener Luft jederzeit und unabhängig vom Zustande der Wirtspflanze Teleutosporen, in feuchter Luft Uredosporen bildet (R. E. Smith). Bei Sporodinia entstehen Sporangien an einem zygotentragenden Mycelium, wenn dies aus feuchter Luft in relativ trockene versetzt wird (Klebs). Starke Turgeszenzänderungen ergeben sich für die submersen Gewächse nicht nur bei Schwankungen des Salzgehaltes, sondern auch beim Uebergang aus Wasser in Luft, und es lassen sich daher auch dabei Hygromorphosen feststellen (oft Aëromorphosen genannt). Manche Pilze, z. B. Ascoidea rubescens, lassen Conidien nur entstehen, wenn ihre Mycelfäden aus der Nährflüssigkeit in Luft kommen; doch läßt sich dabei nicht sicher entscheiden, ob die geänderten Feuchtigkeitsverhältnisse, oder die durch das Luftleben veränderte Ernährung maßgebend sind (Klebs). Bei zahlreichen niederen einzelligen Organismen veranlaßt der Uebergang aus Wasser in Luft, also das Austrocknen direkt die Bildung von Ruhezuständen, Cysten usw.

Bei den höheren Pflanzen ist die Gestaltung ebenfalls weitgehend abhängig vom Feuchtigkeitsgehalte der Umgebung. Ganz unter Wasser zu gedeihen vermögen die Landpflanzen auf die Dauer überhaupt nicht, ebensowenig wie echte Wasserpflanzen dauernd am Lande wachsen können. Doch gibt es eine Reihe von amphibischen Gewächsen, d. h. solchen, die die Fähigkeit besitzen, verschieden gebaute und häufig auch verschieden gestaltete Vegetationsorgane hervorzubringen, je nachdem sie im Wasser oder auf dem Lande leben. Da es bei vielen dieser Gewächse leicht ist, die eine Form durch das Versetzen in das andere Medium in die andere überzuführen, so liegt die Annahme nahe, das Entstehen der Landform sei eine einfache Aëromorphose, das der Wasserform eine Hydromorphose. Darnach würde also die durch die Transpiration am Lande bedingte Wasserentziehung die Landform auslösen, während die Hemmung der Verdunstung im Wasser das Auftreten der Wasserform zur Folge hätte. Wenn dem so wäre, dann müßte auch bei Wasserentziehung unter Wasser durch Beigabe osmotisch wirksamer Substanzen die Landform auftreten. Versuche von Mac Callum an Proserpinaca palustris, die das zu beweisen schienen, haben sich bei der Nachuntersuchung durch Burns nicht bestätigt. Das Problem liegt also sehr viel komplizierter. Göbel (man vgl. dessen ausführliche Behandlung der Frage in der „Experimentellen Morphologie", S. 36ff.) hält die je nach dem Wasser- oder Landleben geänderten Ernährungsverhältnisse für ausschlaggebend. Die genaue Entscheidung muß künftigen Untersuchungen überlassen bleiben.

In der Gestaltung der Landpflanzen spiegelt sich ihre Wasserökonomie genau wieder. Die Bewohner feuchter Standorte (hygrophile Pflanzen) sind ganz anders gestaltet als die trockener (xerophile Pflanzen); man denke etwa an die zartblätterigen Hymenophyllaceen des feuchten Urwaldes einerseits, an die kugelförmigen dornigen Kakteen der Wüste andererseits. Freilich lassen sich diese verschiedenartigen Gestaltungen nicht direkt als Hygro- und Xeromorphosen auffassen. Die Gestaltung der Hygro- wie der Xerophyten erfolgt in der Hauptsache unabhängig von der Feuchtigkeit der Umgebung, sie ist ererbt; auch ist zu bedenken, daß gerade in den extremen Fällen die Transpiration für Xerophyten wie für Hygrophyten gleich gering ist, da in einem Falle durch die Verdunstungsschutzeinrichtungen der Pflanzen, im anderen durch den hohen Feuchtigkeitsgehalt der umgebenden Luft die Wasserverdunstung minimal sein muß. Doch hat der Grad der Transpiration, der eine Pflanze während ihrer Entwickelung unterworfen wird, fast stets einen merkbaren Einfluß auf die Gestaltung, und zwar sowohl auf die innere Ausgestaltung, die Anatomie, wie auf die Morphologie.

Werden Pflanzen in trockener Luft erzogen, so ist im allgemeinen das Längenwachstum verzögert, auch werden die Internodien weniger lang, dafür aber dicker und ihre Zahl wird erhöht; die Festigkeit der Achsenorgane ist größer; die Blätter bleiben kleiner, werden aber dicker; die Haarbildung an Blättern und Stengeln erscheint gefördert; die Wurzelbildung erfolgt reichlicher, der Blattfall, die Blüte und Fruchtbildung eher; die Epidermis-, Rinden- und Markzellen bleiben kleiner; die Bildung von Sekretionsorganen und Kristallzellen wird begünstigt, die Entstehung von Kork und Sclerenchym beschleunigt, die Gefäßbildung gefördert. Kultur in feuchter Luft hat gerade den umgekehrten Erfolg (Kohl, Eberhardt).

Wenn es sich hier meist nur um quantitativ verschiedene Ausbildung gewisser Merkmale bei den Trocken- und Feucht-

Digitized by Google

pflanzen handelt, was freilich die Gestaltung erheblich beeinflußt, so kann in manchen Fällen doch auch die Qualität der Blatt- und Sproßbildung durch den Feuchtigkeitsgehalt der Umgebung beeinflußt werden. Das zeigen besonders deutlich manche xerophile Pflanzen, wenn sie im feuchten Raum kultiviert werden. Veronica tetrasticha und andere xerophile Veronica-Arten Neuseelands besitzen kleine, dem Sproß eng anliegende Schuppenblätter, die nur auf der Außenseite (also der morphologischen Unterseite) Spaltöffnungen führen; werden sie aber aus ihrer sonnigen trockenen Umgebung in einen schattigen feuchten Raum versetzt, so erhalten sie ganz andere Blätter, nämlich solche mit wohlentwickelten, am Rande gezähnten, kurzgestielten und beiderseits Spaltöffnungen führenden Blattspreiten (Göbel, Cockayne). Die neuseeländische xerophile Rhamnacee Discaria Toumatou hat kleine Blättchen, in deren Achseln die Seitensprosse zu 2 bis 3 cm langen Dornen umgebildet sind; wird die Pflanze aber im feuchten Raume kultiviert, so wachsen die Seitenzweige, statt unter Verkümmerung der Blätter sich zu Dornen zu entwickeln, zu beblätterten Sprossen aus (Cockayne). Dabei ist beachtenswert, daß es sich in allen diesen Fällen um Gewächse handelt, bei denen die Jugendform von der späteren morphologisch abweicht; die bei Feuchtkultur auftretende Gestaltungsweise ist immer nur ein Rückschlag auf diese Jugendform (Göbel.)

Aehnlich xerophilen Habitus wie die Bewohner trockener Standorte haben auch die Salzpflanzen (Halophyten). Auch bei ihrer Gestaltung handelt es sich wohl in erster Linie um Hygromorphosen, nicht um Chemomorphosen. Viele Halophyten verlieren auf kochsalzfreiem Boden erzogen die Blattsukkulenz, während umgekehrt manche normalblätterige Gewächse bei Kultur auf chlornatriumreichem Boden mehr oder weniger fleischige Blätter bekommen (Lesage). Eine genauere Präzisierung der Reizursachen fehlt hier aber noch durchaus.

Bei Wasserüberschuß, wie er bei starker Hemmung der Transpiration infolge großen Feuchtigkeitsgehaltes der Luft in den Geweben der Pflanzen eintreten kann, erfolgt in manchen Fällen pathologische Gewebebildung. Es entstehen hyperhydrische Gewebe, Intumeszenzen an den Blättern und Stengeln (vgl. den Artikel „Pflanzenkrankheiten").

Alle diese Hygromorphosen, die an den Pflanzen bei Feucht- oder Trockenkultur, also bei Transpirationshemmung oder -steigerung beobachtet werden, verdienen erhöhtes Interesse deswegen, weil sie immer in dem Sinne auftreten, daß durch sie die Transpirationsänderung bis zu einem gewissen Grade korrigiert wird. Bei Feuchtkultur, also bei Transpirationshemmung, verändert sich die Pflanze hygromorphotisch so, daß Einrichtungen zur Transpirationsförderung auftreten (Vergrößerung der Oberfläche, Verdünnung der Cuticula, weiteres Auseinanderrücken der Blätter usw.); bei Trockenkultur erscheinen umgekehrt Einrichtungen zur Transpirationshemmung (dichtes Haarkleid, Verringerung der Oberfläche, nahes Zusammenrücken der verdunstenden Blattflächen, starke Cuticula usw.).

ε) Einfluß der Temperatur; Thermomorphosen. Selbstverständlich ist alles Pflanzenwachstum nur oberhalb eines bestimmten Minimums und unterhalb eines bestimmten Maximums der Temperatur möglich; innerhalb der zulässigen Temperaturgrenzen ist aber der formative Einfluß der Außentemperatur auf die Gestaltung (Thermomorphosen) nicht sehr wesentlich. Zwar beeinflußt die Temperatur indirekt die Gestaltung und damit den Habitus der Pflanzen nicht unerheblich insofern, als die Wachstumsintensität, die Länge der Streckungszone, die Wachstumsrichtung der Sprosse und Blätter von ihr abhängig sind. Und so ist wohl so mancher Unterschied im Habitus der arktischen und alpinen Gewächse einerseits und der tropischen und im Tiefland wachsenden Pflanzen andererseits auf eine solche indirekte Temperaturwirkung zurückzuführen. Eigentliche Thermomorphosen aber dürften selten sein.

Die Grünalge Stigeoclonium geht bei Kultur in niederer Temperatur aus dem Fadenstadium, das sie bei höherer Temperatur besitzt, in die Palmellaform über (Livingston). Wird der Hutpilz Coprinus stercorarius im Licht und im Dunkeln bei 12° C kultiviert, so tritt nur in der Lichtkultur Hutbildung ein; eine weitere Steigerung der Temperatur um 3° C bewirkt aber, daß auch im Dunkeln Hüte entstehen (Brefeld). Die Alge Bumilleria sicula wächst im Winter bei 13 bis 17 ° C vegetativ, bildet aber Zoosporen nach der Uebertragung in eine Temperatur von 5 bis 6° C (Klebs). Umgekehrt wird bei der Alge Oedogonium diplandrum lebhafte Zoosporenbildung bewirkt, wenn sie, erst bei 10° C kultiviert, einer Temperatursteigerung von 5° C unterworfen wird (Klebs). Aehnliches findet sich auch bei höheren Pflanzen. Nach Humboldt kann der Weizen im tropischen Mexiko nur als Grünfutter verwendet werden, weil er unter dem Einfluß der ständigen hohen Temperatur sich dauernd vegetativ entwickelt. Die Composite Nardosmia frigida, die über den größten Teil des arktischen Gebietes verbreitet ist, bringt nur an der Südgrenze ihres natürlichen Verbreitungsgebietes Blüten und Früchte; weiter nordwärts vermehrt sie sich

Digitized by Google

ausschließlich durch Ausläufer (Kerner v. Marilaun). Nuphar luteum bildet unter 12° C keine Schwimmblätter (Brand). Läßt man die Kartoffelsorte „Marjolin" bei einer Temperatur von 25 bis 27° C austreiben, so gehen Laubtriebe aus den Augen hervor; läßt man sie bei nur 6 bis 7° C keimen, so entwickeln sich an den Mutterknollen sofort wieder an Stelle von Laubtrieben junge Knollen (Vöchting).

In allen diesen Fällen handelt es sich wohl kaum um eigentliche Thermomorphosen; wahrscheinlicher ist, daß die Temperatur indirekt wirkt, d. h. sie beeinflußt irgendeinen oder mehrere physiologische Vorgänge (Stoffaufnahme, Stoffwanderung, Stoffumsetzung, Wachstumsgeschwindigkeit usw.), und diese erst wirken auf die Formbildung.

ζ) Einfluß des Kontaktes; Thigmomorphosen. Wirkungen des Kontaktes auf die Gestaltung (Thigmomorphosen, Haptomorphosen) sind nicht allgemein verbreitet, kommen aber bei vielen Pflanzen vor, für die die Herstellung eines Kontaktes mit gewissen Körpern der Außenwelt wichtig ist. So entstehen z. B. die Rhizoiden vieler auf Steinen im Wasser festsitzender Algen infolge des Berührungsreizes mit der Unterlage (Borge). Die Haftorgane verschiedener parasitischer Pilze bilden sich nur bei Berührung mit festen Körpern (Büsgen), ebenso die Haarwurzeln der Wasserform von Riccia fluitans (Göbel). Auch die Ausbildung der Haftscheiben, mit deren Hilfe die Ranken verschiedener Arten von Ampelopsis, Cissus, Bignonia usw. an Steinen, Baumrinden und dergleichen befestigt werden, wird durch den Kontaktreiz veranlaßt (Mohl), der bei denjenigen Ranken, die sich durch Umschlingung mit der Stütze vereinigen, ein oft sehr erhebliches nachträgliches Dickenwachstum und damit die Entstehung eines sehr starken Holzkörpers bewirkt. In allen diesen Fällen ist bemerkenswert, daß die Berührung mit Wasser nicht thigmomorphotisch wirkt; es vermögen also die für Kontakt empfindlichen Organe wie wir durch unser Tastgefühl den festen und flüssigen Aggregatzustand zu unterscheiden.

In den bisher angeführten Fällen handelte es sich um Pflanzen, die thigmomorphotisch Haftorgane ausbilden, um sich am Substrat zu befestigen. Eine zweite Klasse von Pflanzen, für die der Kontakt mit bestimmten Objekten der Außenwelt wichtig ist, sind die Parasiten, und auch bei ihnen kommen nicht selten Thigmomorphosen vor. So wird z. B. bei verschiedenen Kleeseidearten (Cuscuta europaea, epilinum u. a.) die Bildung der Haustorien, mit denen sie in den Stengel der Wirtspflanzen eindringen, durch den Kontakt mit einem festen Körper hervorgerufen (Mohl). So wird es verständlich, daß die Saugwurzeln nur an der dem Substrate zugewendeten Seite entstehen, während sie, wenn man für allseitigen Kontakt mit einem festen Körper sorgt, allseitig entstehen. Diese Kontaktreizbarkeit der Cuscuta-Arten wird dadurch besonders merkwürdig, daß sie nur bei einseitiger Einwirkung der Schwerkraft vorhanden ist: am Klinostaten gezogene Pflanzen verlieren sie (Peirce). Nach Molliard können übrigens die Haustorien der Cuscuta monogyna auch infolge chemischer Reizung unter Ausschluß aller Kontaktwirkung gebildet werden, und bei sehr vielen Parasiten, besonders pilzlichen, ist die Haustorienbildung wohl überhaupt als Chemomorphose, nicht als Thigmomorphose zu betrachten.

Um sehr komplizierte, aber noch nicht genügend gesicherte Fälle von Thigmomorphosen handelt es sich bei den Angaben von Sachs, daß die Bildung der bekannten als Insektenfallen dienenden Kannen von Nepenthes unter Umständen in einer Beziehung zu einem Berührungsreize stünde, und von Raciborski, daß gewisse tropische Farnkräuter nur dann Sporophylle trügen, wenn ihr Stamm sich an einer Stütze befestigen konnte.

η) Einfluß von Druck und Zug; Mechanomorphosen. Zug und Druck bewirken, wenn sie auf Pflanzen oder Pflanzenteile in geeigneter Stärke einwirken, meistens nur Deformationen, selten eigentliche Mechanomorphosen.

Als Beispiele für einfache rein mechanische Druckwirkungen lassen sich etwa Wurzeln anführen, die, wenn sie sich durch enge Spalten hindurchzwängen müssen, Bandform annehmen. Die einseitige Kronenausbildung von Bäumen, die (in der Nähe der Küste oder im Gebirge) dauernd starken vorherrschenden Winden ausgesetzt sind, ist ebenfalls zum Teil als mechanische Deformation anzusehen: die Zweige werden durch den Winddruck nach der Leeseite abgebogen, und diese Abkrümmung wird schließlich durch Wachstum fixiert. Auch die Krümmungen und Faltungen, die bei vielen Pflanzenfamilien die jugendlichen Blätter in den Knospen und die Embryonen im Samen (Amarantaceen, Cruciferen, Solanaceen und andere) aufweisen, sind wohl größtenteils rein mechanisch bedingt; wenigstens für einige Cruciferen hat Hannig experimentell nachgewiesen, daß der Embryo an sich das Bestreben hat, gerade zu wachsen, aber durch die Raumverhältnisse im Embryosack zu Krümmungen der Keimlingsachse und Faltungen der Keimblätter gezwungen wird. All das kann nicht als Mechanomorphose aufgefaßt werden, weil hier

Digitized by Google

Druck, Zug und Spannung nicht als gestaltbildender Reiz wirken, sondern rein mechanisch die Form beeinflussen. Doch gibt es auch echte Mechanomorphosen. Zunächst ist zu erwähnen, daß Druck und Zug die Richtung der Zellteilung zu beeinflussen vermöge (Kny, Giesenhagen). Bei der Flechte Ramalina reticulata wird die Intensität des Längen- und Dickenwachstums durch den Zug, der auf den herabhängenden Thallus durch sein eigenes Gewicht und den Wind ausgeübt wird, modifiziert (Peirce), und auch bei vielen höheren Pflanzen wird durch gesteigerten Zug eine gewisse Beschleunigung des Wachstums verursacht, so daß vielleicht die bedeutende Verlängerung mancher Pflanzen (Potamogeton-Arten, Ranunculus fluitans und andere) in rasch fließendem Wasser als mechanomorphotische Wirkung des vermehrten mechanischen Zuges angesehen werden kann. Nuphar luteum und Ranunculus aquatilis bringen in schnell fließenden Bächen niemals Schwimmblätter und Blüten hervor, was sie in ruhigen Gewässern tun (Reinke), und auch dabei wirkt vielleicht ein mechanischer Reiz mit.

Ob durch Zug- und Druckwirkungen die Gewebebildung beeinflußt werden kann, bedarf noch der exakten experimentellen Feststellung. Jedenfalls liegt die Sache nicht so einfach, wie man früher auf Grund ungenügender Versuche annahm, daß die Pflanze auf erhöhte Zug- und Druckbeanspruchung mit einer proportionalen Verstärkung der mechanischen Gewebeelemente antwortet. Doch ist es z. B. wahrscheinlich, daß Zug- und Druckwirkungen die Ursache der sogenannten Rotholzbildung bei Nadelbäumen sind (Hartig, Sonntag; nach Ewart und Mason-Jones soll hier freilich eine Gravitationswirkung vorliegen), und nach einer von Schwarz aufgestellten, freilich nicht genügend gestützten Theorie soll der Lastdruck des Baumes das gesamte Dickenwachstum und seine Modalität, insbesondere auch die Ausbildung der mechanischen Elemente des Holzes regulieren durch Reizwirkung auf das Cambium. — Naturgemäß muß jedes Gewächs soviel mechanisches Gewebe besitzen, um sich selbst tragen und die durch den Wind verursachten, oft sehr erheblichen Zug- und Druckspannungen aushalten zu können; auch muß dies Gewebe in einer Verteilung und Anordnung vorhanden sein, die es ermöglicht, daß der jeweiligen mechanischen Inanspruchnahme in zweckmäßiger Weise entsprochen wird (Schwendener). Es ist also ökologisch wohl verständlich, daß z. B. in ruhigem Wasser flottierende Pflanzen, für die das Gewicht der Stengel und Blätter durch den Auftrieb des Wassers minimal ist, sehr arm an mechanischem Gewebe sind, während die sturmgepeitschte Eiche ein äußerst festes Holz besitzt. Das kausale Verständnis aber für die Entstehung der mechanischen Gewebe in der Ontogenese fehlt uns noch durchaus, da zwischen dem Grad der Ausbildung und der spezifischen Festigkeit des mechanischen Gewebes einerseits und der Intensität der mechanischen Reizung andererseits keine Proportionalität besteht, und es nach dem Stande unserer Kenntnisse unzulässig ist, hier die mechanomorphotische Wirkung eines funktionellen Reizes anzunehmen.

Die Organbildung kann auch durch Zug- und Druckkräfte beeinflußt werden. So wird an eingekrümmten Stengeln häufig das Auswachsen der auf der Konvexseite befindlichen Knospen gefördert (Vöchting), und auch an gekrümmten Wurzelstücken entstehen neue Seitenwurzeln nur auf der Konvexseite, während auf der Konkavseite nur die schon vor der Krümmung vorhandenen Wurzelanlagen auszuwachsen vermögen (Noll). Wahrscheinlich sind hier Spannungsdifferenzen zwischen den beiden Flanken in erster Linie maßgebend. Nach der mechanischen Blattstellungstheorie (Schwendener, Schumann) sollen Druckdifferenzen an den verschiedenen Punkten der Oberfläche, die an den Vegetationspunkten durch die älteren Blätter bewirkt würden, die Stellung der Blattanlagen bedingen; doch fehlt für das Vorhandensein solcher Druckdifferenzen durchaus der Nachweis, und auch aus anderen Gründen erscheint die mechanische Blattstellungstheorie nicht haltbar.

ϑ) Einfluß anderer Organismen. Die Gestaltung der Pflanzen kann in vielen Fällen wesentlich beeinflußt werden durch andere Organismen, mit denen sie entweder in enger Symbiose leben, oder die als Parasiten in ihnen leben. Ersteres ist bei den Flechten, letzteres bei den Gallen der Fall.

Bei den Flechten läßt sich schwer entscheiden, wie weit die Gestaltung des meistens für den Habitus der ganzen Lichene maßgebenden Pilzes durch den Algenpartner beeinflußt wird, da wir die flechtenbildenden Ascomyceten nicht im freilebenden Zustande kennen. Die Gonidien dagegen sind auch außerhalb der Flechte leicht zu kultivieren, und für sie ist sicher, daß ihre Gestaltung und Entwickelung innerhalb der Lichene in vieler Hinsicht anders verläuft als im freilebenden Zustande. So wird die typische Zellform der Alge durch die Symbiose mit dem Pilz oft ziemlich weitgehend verändert, und mit ganz wenigen Ausnahmen können die Gonidien innerhalb der Flechte keine Schwärmsporen bilden, sind aber nach der Befreiung von dem Pilz sofort wieder imstande dazu. Diese morphogene Beeinflussung der Alge durch den Pilz in der Flechte

Digitized by Google

mögen in erster Linie als Chemo- und Mechanomorphosen aufzufassen sein; sicheres läßt sich darüber noch nicht sagen.

Ebenso in erster Linie chemomorphotisch dürften die zum Teil sehr auffälligen Umgestaltungen zu deuten sein, die viele Pflanzen durch den Befall mit gewissen pilzlichen Parasiten erleiden. Es sei an den Hexenbesen der Tanne, hervorgerufen durch Melampsorella caryophyllacearum, erinnert. Ueber die Cecidien vgl. den Artikel „Gallen", über die Chimären den Artikel „Transplantation".

2b) Von der Beeinflussung der Gestaltung durch innere Faktoren. Der wichtigste Faktor der Gestaltung ist die spezifische Struktur, die erblich überkommene Organisation des Protoplasmas, auf der die Konstanz der Art durch die verschiedenen Generationen hindurch und die spezifische Reaktionsfähigkeit des Individuums den Außeneinflüssen gegenüber beruht. Mit ihr rechnet vorläufig die Entwickelungsphysiologie als einem gegebenen Faktor.

α) Entwickelungsphysiologische Bedeutung des Aggregatzustandes des Protoplasmas. Die Frage nach dem Aggregatzustande des Protoplasmas fällt ins Gebiet der allgemeinen Physiologie; doch ist die Entwickelungsphysiologie insofern an der Beantwortung der Frage interessiert, als vom Aggregatzustande des Protoplasmas eine Reihe von Formbildungsvorgängen beeinflußt werden müssen.

Eine verbreitete, vor allem von Berthold, Bütschli und Rhumbler verteidigte Theorie nimmt an, das Protoplasma sei eine Flüssigkeit. Seine Normalform wäre dann die Kugel. In der Tat nehmen ja auch plasmolysierte Protoplasten und Protoplasmastücke, die nach Verwundungen in die umgebende Flüssigkeit austreten, Kugelgestalt an, und auch für manche Organe vieler Zellen (Kern, Nukleolen und andere) ist die Normalform die Kugel. Abweichungen von der Kugelgestalt, die ja bei zahllosen Einzelligen und bei fast allen im Gewebeverbande lebenden Zellen die Regel sind, wären dann zu erklären als mechanische Druck- und Zugwirkungen und als Folgen geänderter Oberflächenspannung. Doch können wir vorerst Abweichungen von der Kugelgestalt höchstens insofern verstehen, als es sich um mechanisch bewirkte Zwangsformen handelt; die oft so komplizierten Gestaltungen der Einzelligen auf ein Spiel physikalisch-chemischer Kräfte, unter denen die Oberflächenspannung die Hauptrolle spielt, zurückzuführen, will schon deswegen noch nicht gelingen, weil es zum mindesten fraglich erscheint, ob die gerade für die Gestaltung der ganzen Zelle maßgebende äußerste Hautschicht des Protoplasmas bei ihrer beträchtlichen Kohäsion als flüssig angesehen werden kann, und weil bei alledem der unserer kausalmechanischen Analyse noch völlig unzugängliche Faktor der spezifischen Struktur einen wichtigen Einfluß ausübt.

Auf der Grundannahme einer schleimig-flüssigen Konsistenz des Protoplasmas bauen sich auch die Theorien über die Richtungsbestimmung der Scheidewände in sich teilenden Zellen auf. Es ist eine Beobachtungstatsache, daß die Stellung dieser Scheidewand in jedem Falle der Gleichgewichtslage einer gewichtslosen Flüssigkeitslamelle entspricht, die an der betreffenden Stelle im Hohlraum der Zelle ausgespannt wäre; es ergibt sich also eine volle Uebereinstimmung der Zellwandstellung mit den von den Physikern (Plateau und Anderen) entwickelten Gesetzen für die Gleichgewichtslage gewichtsloser Flüssigkeitshäutchen (Sachs, Berthold, Errera). Doch lassen sich die Gesetze nicht ohne weiteres auf die Zellteilung übertragen, da Flächenspannungen in der jungen Zellwand erst wirksam werden können, wenn sie rings an die Mutterzellwand angeschlossen ist, womit aber eine Verschiebung zu einer angestrebten Gleichgewichtslage bereits ausgeschlossen erscheint. Die Sache liegt vielmehr so (Giesenhagen): bei der Zellteilung haben die Tochterzellen das Bestreben, im Hohlraum der Mutterzelle diejenige Gestalt anzunehmen, in der sie die kleinste mögliche Oberfläche besitzen. Da sie in ihrer Gestalt vom Hohlraum der Mutterzelle abhängig sind, kann sich das aus der Kohäsion abzuleitende Bestreben zur Verkleinerung der Oberfläche nur auf die freie Berührungsfläche der beiden Tochterzellen beziehen, die daher zu einer Fläche minimae areae wird. Die Einstellung der Berührungsfläche der beiden Tochterzellen ist also ein rein mechanischer Vorgang, bei dem der Zellenleib nicht anders mitwirkt als ein Flüssigkeitstropfen von gleicher Dichte, und da sie erfolgt, bevor die Teilungswand ausgebildet ist, diese aber ihre Lage angewiesen erhält durch die Lagerung der beiden Tochterzellen, zwischen denen sie sich bildet, so befindet sich die Scheidewand, wenn sie sich an die Wand der Mutterzelle ansetzt, schon in der Lage, die nach Plateau der Gleichgewichtslage einer gewichtslosen Flüssigkeitslamelle entspricht. Auch Abweichungen von dem für die meisten Fälle (besonders in Meristemen) gültigen Prinzip der rechtwinkligen Schneidung der Teilungswände, wie sie in Moosprotonemen z. B. nicht selten sind, lassen sich auf Grund dieser Annahme verstehen (Näheres bei Giesenhagen, Studien über Zellteilungen im Pflanzenreiche. Stuttgart 1905).

β) Die Zellteilung, ihre Ursachen

Digitized by Google

und die **Bestimmung ihrer Richtung.** Die Zellteilung ist zwar keine allgemeine Bedingung für das Fortschreiten des Wachstums, denn es gibt große kompliziert gestaltete einzellige Pflanzen (Caulerpa z. B.), und die größten bekannten Zellen, die Milchsaftschläuche mancher Euphorbiaceen, können jahrzehntelang wachsen, sich unendlich oft verzweigen und eine Gesamtlänge von mehreren hundert Metern erreichen, ohne sich jemals zu teilen. Aber umgekehrt ist Wachstum unerläßlich, um die Zellteilung zu ermöglichen. Nur ausnahmsweise und vorübergehend können Zellen sich teilen, ohne zu wachsen (Furchung), so bei der Alge Hormidium nitens, wenn sie in Kongorotlösung kultiviert wird, da darin das Flächenwachstum der Membran gehemmt, die kugelig angeschwollene Zelle aber nicht am Eingehen mehrerer Teilungen verhindert wird (Klebs), oder bei Blattstecklingen von Torenia asiatica, deren oberseitige Epidermiszellen sich lebhaft fächern, ohne zunächst zu wachsen (Winkler). Im allgemeinen also würde bei denjenigen Pflanzen, die bei ihrem Aufbau auf Zellteilungen angewiesen sind, alle weitere Gestaltung mit dem Unterbleiben der Zellteilung unterbleiben.

Wenn also auch im allgemeinen das Wachstum eine notwendige Vorbedingung für die Zellteilung ist, so ist es doch nicht einfach als ihre Ursache anzusehen etwa in dem Sinne, daß beim Ueberschreiten einer gewissen Zellgröße in gesetzmäßiger Abhängigkeit davon eine Zellteilung einträte. Denn in der normalen Ontogenese sowohl wie bei pathologischer Entwickelung können vielfach Zellen über das „normale" Maß hinauswachsen, ohne sich zu teilen.

Ebensowenig wie allgemein das Wachstum der Zelle über ein gewisses Maß hinaus als die auslösende Ursache der Zellteilung angesehen werden kann, kann dafür ein Heranwachsen des Kerns bis zur Maximalgröße und eine hierdurch bedingte Kernteilung verantwortlich gemacht werden. Denn erstens kann ein übermäßiges Kernwachstum zwar ein übernormales Zellenwachstum, nicht aber Kern- und Zellteilung bedingen (vgl. den folgenden Abschnitt), und zweitens ist Zellteilung keineswegs immer die notwendige Folge der Kernteilung, wie die Fälle freier Kernteilung in der Ontogenese (Embryosack, Endosperm, Milchröhrenentwickelung usw.) und zahlreiche pathologische Vorkommnisse und experimentelle Erfahrungen beweisen.

Die Zellteilung läßt sich also nicht als unmittelbare notwendige Folgeerscheinung des Wachstums auffassen. Welche Faktoren sie in jedem einzelnen Falle bedingen, darüber fehlen uns alle Anhaltspunkte. Wir können nur vermuten, daß sie sehr mannigfaltiger und zum Teil sehr komplizierter Natur sein mögen. Denn erwachsene Zellen können durch sehr verschiedenartige Reize zu erneuten Teilungen veranlaßt werden. So, wie die Gallbildungen vermuten lassen, durch chemische Reize; mechanischer Druck veranlaßt die Markzellen von Impatiens, sich zu teilen (Kny); Verwundung eines Organes bewirkt fast in allen der Wunde nahe gelegenen Zellen Teilung, reicher Nahrungszufluß oder funktionelle Reizung kann dasselbe zur Folge haben und anderes mehr. In allen diesen Fällen ist es freilich schwer, den unmittelbaren Teilungsreiz zu präzisieren. Uebrigens wird schon im normalen Entwickelungsverlauf durch die Befruchtung in deutlicher Weise demonstriert, wie durch einen besonderen, hier durch das Eindringen der männlichen Keimzellen in das Ei gegebenen Reiz eine vorher nicht entwickelungsfähige Zelle entwickelungs- und teilungsfähig gemacht werden kann. Vielleicht daß die von Loeb und anderen so erfolgreich begonnene Analyse der induzierten Parthenogenesis, die freilich bisher ausschließlich an tierischen Objekten hat vorgenommen werden können, uns dereinst auch Aufschluß über die Ursachen der Zellteilung verschafft.

Nicht nur der Eintritt, sondern auch der Modus der Zell- und Kernteilung ist bis zu einem gewissen Grade von äußeren Faktoren abhängig. So kann die Zelle (z. B. in Wurzelspitzen von Pisum sativum durch Benzoldämpfe) gezwungen werden, sich anstatt in zwei Tochterzellen, simultan in mehrere zu teilen (Blazek), und sich normalerweise stets karyokinetisch teilende Zellen (z. B. von Spirogyra bei Aethereinwirkung) können veranlaßt werden, ihren Kernteilungsmodus zu ändern (Nathansohn).

Wovon die Richtung abhängt, in der die Zellteilung vor sich geht (die dabei entstehende Wand steht senkrecht dazu), ist meistens auch unbekannt. Inwiefern die Form der Mutterzelle und das Prinzip der minimae areae dabei mitwirken, wurde schon im vorigen Abschnitt kurz erörtert. In manchen Fällen hat sich eine deutliche Abhängigkeit der Lage der Kernspindel und damit der neuen Querwand von der Richtung äußerer Faktoren ergeben. Einseitig einfallendes Licht bewirkt, daß in keimenden Sporen von Equisetum die Kernspindel sich parallel zur Lichtrichtung einstellt, so daß also die erste Teilungswand senkrecht zu diesem orientiert ist (Stahl), das gleiche gilt auch für viele keimende Algeneier und Sporen. Es handelt sich dabei um in entwickelungsphysiologischer Hinsicht sehr wichtige Teilungen, da durch sie für die sich entwickelnde Pflanze ein für allemal darüber entschieden wird, was zum Sproßpol und was zum Wurzelpol werden wird. Auch

Digitized by Google

mechanische Faktoren können die Richtung der Zellteilung beeinflussen (Kny, Němec): in gepreßten Eiern von Fucus oder gepreßten Sporen von Equisetum stellen sich die Teilwände, in gebogenen Scheiben aus Kartoffelknollen die Wände der entstehenden Peridermzellen senkrecht zur Richtung des Zuges und in die Richtung des Druckes ein. Bei manchen Pflanzen, an denen sich (es geschieht das immer endogen) Adventivwurzeln bilden, wird die Stengelepidermis durch die sich von innen herauszwängende Wurzel stark gedehnt und hervorgewölbt, wobei ihre an sich ausgewachsenen Zellen z. B. bei Lysimachia nummularia antikline Teilungen erfahren (F. Wettstein), worin man zweifellos eine Reizwirkung der Druck- und Zugspannung zu erblicken hat. Auch einseitiges Zudiffundieren gewisser chemischer Substanzen, die Schwerkraft und andere Faktoren mögen hier und da die Teilungsrichtung beeinflussen. In allen diesen Fällen bedarf es noch der genauen entwickelungsphysiologischen Analyse, ob der Einfluß des richtenden Faktors sich unmittelbar auf die Stellung der Kernspindel erstreckt oder ob nicht vielmehr durch ihn polare Differenzen im Plasma der Zelle geschaffen werden, die ihrerseits die Einstellung der Teilungsspindel bestimmen.

γ) Die Zellengröße, ihre Determinierung und ihre entwickelungsphysiologische Bedeutung. Sachs hat zuerst darauf hingewiesen, daß die Zellengröße von hoher Bedeutung für die Organisation und Architektonik der Pflanzen ist. Im Vergleich zu den riesigen Schwankungen der Lineardimensionen ganzer Pflanzen (etwa Bakterien einerseits, Wellingtonien andererseits, deren lineare Dimensionen sich wie 1:100000000 verhalten mögen) haben die Zellengrößen einen ziemlich hohen Grad von Konstanz: sie bewegen sich nur von 1 zu etwa 20 oder 30. Sehr verschieden große Pflanzen sind also im allgemeinen aus etwa gleich großen Zellen aufgebaut, und es gilt der Satz, daß zwischen der Größe der Organe und der ihrer Zellen keinerlei Proportionalität besteht; die Größe der Organe, zumal homologer Organe, steht vielmehr mit der Zahl der Zellen im Verhältnis. Für die Organisation der Pflanzen, wie sie einmal ist, ist also offenbar eine bestimmte Zellengröße am vorteilhaftesten, und es läßt sich ja auch leicht vorstellen, daß bei einer Vergrößerung oder Verkleinerung aller Zellen um das 100- oder 1000-fache ein Moos oder ein Baum nicht oder nur bei völliger Veränderung der Organisation existenzfähig wären (dem widerspricht natürlich nicht, daß einzelne Zellen, wie die Milchröhren oder Bastfasern, eine beträchtliche Länge erreichen können). Da an sich sehr große Zellen lebensfähig sind und weitgehende Differenzierung annehmen können, wie z. B. die zahlreichen Caulerpa-Arten beweisen, so ist in der relativ geringen Normalgröße der Zellen wohl eine spezifische Anpassung an den Aufbau des Pflanzenkörpers aus zahlreichen Bausteinen und die damit notwendig verbundene eingehende Arbeitsteilung zu erblicken.

Von äußeren Faktoren ist die spezifische Zellengröße ziemlich unabhängig, wenn sie auch in mäßigen Grenzen mit der Nahrungsmenge, dem Vorhandensein oder Fehlen des Lichtes usw. schwankt. Sogar wenn das angestrebte Wachstum durch mechanischen Widerstand (Eingipsen) unmöglich gemacht wird, bewahren die Zellen des Vegetationspunktes annähernd die normale Größe (Pfeffer). Es muß also die spezifische Zellengröße durch in der Pflanze gelegene Faktoren festgelegt sein.

Neuere Untersuchungen machen es wahrscheinlich, daß bei der Fixierung der Zellgröße eine ausschlaggebende Rolle dem Zellkern zukommt. Bei Spirogyra gelingt es durch gewisse experimentelle Eingriffe (Abkühlung, Behandlung mit Aether usw.), die Teilung der Zellen so zu beeinflussen, daß die beiden Tochterkerne in die eine der beiden Tochterzellen geraten, anstatt sich auf beide zu verteilen. Die so entstandene Zelle mit abnorm hohem Kernmassengehalt wächst nun zu übernormaler Größe heran und liefert durch wiederholte Teilungen einen großkernigen und großzelligen Riesenfaden (Gerassimoff). Bei Laubmoosen, z. B. bei Amblystegium serpens, ist es gelungen (El. & Em. Marchal), durch wiederholt experimentell induzierte Aposporie Gametophyten zu erzeugen, die sich vom normalen Geschlechtspflänzchen dadurch unterschieden, daß sich in ihren Zellen die doppelte oder vierfache Kernmasse befand; es zeigte sich, daß der Gametophyt mit der doppelten Kernmasse durchgängig größere Zellen besaß als der normale, der mit der vierfachen Kernmasse wieder größere als der mit der doppelten. Aehnliche Beobachtungen sind auch an anderen Objekten gemacht worden, so daß man in der Tat von einer gewissen Abhängigkeit der Zellengröße von der in ihr enthaltenen Kernmasse sprechen kann. Damit stimmen auch die Resultate überein, die sich bei der experimentell erzeugten generativen Parthenogenesis ergeben haben. Da nun die Kernmasse abhängig ist von der Zahl der Chromosomen, die der Kern bei seiner Entstehung erhalten hat, und die Chromosomenzahl erfahrungsgemäß konstant ist, so ist damit auch die Konstanz der spezifischen Zellengröße gewährleistet, und es mag die Bedeutung der Konstanz der Chromosomenzahl zum Teil darin liegen, daß durch sie

Digitized by Google

das Beibehalten der vorteilhaften Zellengröße garantiert wird.

δ) Die strukturelle Organisation der Zelle und ihre entwickelungsphysiologische Bedeutung; Anisotropie, Polarität. Nicht nur für die Einzelligen, sondern auch für die höheren Pflanzen ist die strukturelle Organisation der Zelle von großer Bedeutung für die Entwickelung. Gemeint ist dabei nicht die spezifische Struktur des Protoplasmas, auf Grund derer z. B. aus dem Ei einer Buche immer wieder eine Buche, aus der Spore eines Fliegenpilzes immer wieder ein Fliegenpilz entsteht, sondern diejenige Organisation der Zelle, kraft derer die Anlage, Entwickelung und Anordnung der einzelnen Organe planmäßig erfolgt. Es handelt sich dabei vor allem um die Probleme von der Isotropie oder Anisotropie der Eier und Sporen und von der Polarität der Zellen.

Da alle höheren Pflanzen einmal in ihrem Leben, auf dem Stadium des befruchteten Eies, einzellig sind, so ist für sie alle die Frage nach der Bedeutung des Eibaues für die Entwickelung ein entwickelungsphysiologisches Problem. Es wäre erstens denkbar, daß das Ei anisotrop wäre, d. h. daß es eine ganz bestimmte, zu den Teilen der erwachsenen Pflanze resp. des Keimlings in fester Beziehung stehende Organisation besäße, etwa in dem Sinne, daß räumlich festgelegte Beziehungen bestünden zwischen bestimmten Anlagesubstanzen im Ei und späteren Organen der sich aus dem Ei entwickelnden Pflanze. Zweitens aber könnte das Ei auch isotrop sein, d. h. alle Teile des Eiplasmas könnten gleichwertig sein, und das Ei besäße keine bestimmte Struktur, deren Vorhandensein einen bestimmten typischen Entwickelungsmodus bedingte.

Die Frage, ob die Eier (oder Sporen) der Pflanzen isotrop oder anisotrop gebaut sind, ist natürlich für jeden einzelnen Fall nur experimentell zu entscheiden; entsprechende Versuche liegen aber bisher kaum vor. Das liegt in der Hauptsache an technischen Schwierigkeiten, da die sich im Innern des Embryosackes in innigem Zusammenhang mit der Mutterpflanze entwickelnden Eier der höheren Pflanzen sich nur sehr schwer für solche Versuche verwenden lassen. Den Zoologen steht in dieser Hinsicht ein sehr viel günstigeres Material zur Verfügung, und dessen ausgedehnte Verwendung zu den entsprechenden Experimenten hat zu der Erkenntnis geführt, daß (in der allgemeinen Formulierung von Przibram) „in den Eiern ein Bau aus verschiedenen Substanzen vorhanden ist, der die Entstehung einer Mannigfaltigkeit garantiert". Es sind also im allgemeinen die tierischen Eier anisotrop im oben definierten Sinne, und zwar kann die Anisotropie radiär sein, wie bei den Medusen, d. h. die Substanzen sind in allen Radien gleichmäßig verteilt, oder polar, wie bei den Echinodermen, d. h. die Substanzen sind um eine bestimmte Achse herum angeordnet, oder bilateral-symmetrisch, wie bei den Amphibien, oder noch komplizierter.

Ob Entsprechendes bei Pflanzen verwirklicht ist, läßt sich schwer beurteilen. Sicher ist aber die Bedeutung des Eibaues für die tierische Entwickelung wichtiger wie für die pflanzliche, da bei jener schon in den allerersten Stadien über die Anlage und Verteilung der wichtigsten Organe entschieden wird, während bei der Pflanze, die embryonales Material in ihren Vegetationspunkten zeitlebens für ihre Weiterentwickelung zur Verfügung behält, über Vieles erst sehr viel später die Entscheidung fällt. Immerhin sind doch oft gerade die ersten Teilungen in entwickelungsphysiologischer Hinsicht sehr bedeutungsvoll. So erfolgt bei manchen Angiospermen zu Beginn der Entwickelung eine Querteilung im Ei; die eine der beiden Zellen (natürlich die nach der Mikropyle zu gelegene) wird zum Embryoträger, die andere zum Embryo. Bei manchen Algen liefert die erste Eiteilung zwei Zellen, von denen die eine die Rhizoiden, die andere den Thallus liefert. Aus der ersten Eiteilung von Marsilia resultieren zwei Zellen, von denen die eine den Stammscheitel und den Kotyledo, die andere die Wurzel und den Fuß bildet. In allen diesen und ähnlichen Fällen könnte sehr wohl für die Verschiedenheit der beiden ersten Zellen, die sich aus ihrem weiteren Schicksal ergibt, der Eibau maßgebend sein, insofern als in dem Ei etwa die Thallus- und Rhizoidenanlagen so verteilt waren, daß sie durch die erste Teilung auf die beiden Teilprodukte verteilt wurden. Der strukturellen Organisation des Eies käme dann in der Tat ein erheblicher Einfluß auf die Entwickelung zu.

Hier müssen künftige Experimente die Entscheidung bringen. Vorläufig läßt sich nur anführen, daß bei der Braunalge Cystosira barbata sich vom unbefruchteten Ei unbeschadet seiner Befruchtungs- und Entwickelungsfähigkeit ziemlich große Stücke absprengen lassen, ohne daß die aus so behandelten Eiern entstehenden Keimlinge irgendwelche Ausfallserscheinungen zeigten (Winkler). Da es natürlich ganz beliebige und in jedem Versuch verschiedene Eistücke sind, die dabei von der Teilnahme am Aufbau des Keimlings ausgeschlossen werden, so kann man wohl auf einen isotropen oder radiär anisotropen Eibau bei Cystosira schließen. Doch muß man sich angesichts der zoologischen Ergebnisse hüten, diese Schlußfolgerung zu verallgemeinern.

Digitized by Google

Nahe verwandt und teilweise identisch mit dem Problem der Anisotropie des Eies ist das Problem der Polarität der Zellen, d. h. die Frage, ob den Zellen eine inhärente polare Struktur zukommt, auf deren Vorhandensein es beruht, daß die Zellen an den Enden der Hauptachse und die vielzelligen Pflanzen am Sproß- und Wurzelpol eine differente morphologische Ausbildung erfahren.

Es sind verschiedene Stufen solcher Polarität denkbar. Die Zelle kann zunächst ganz apolar sein, d. h. keine bestimmte Hauptachse besitzen, wie das dem Anschein nach bei kugeligen Algenzellen, wie z. B. Pleurococcus, der Fall ist. Sie kann ferner äquipolar sein, d. h. eine hervortretende Hauptachse besitzen, an deren Enden aber gleich gebaut sein, wie z. B. Spirogyra. Und sie kann endlich inäquipolar sein, d. h. an den Enden der Haupachse verschieden gestaltet (Verticibasalität, Bipolarität), wozu noch eine polare Differenzierung in den Richtungen senkrecht zur Hauptachse kommen kann (transversale Polarität, Dorsiventralität). Bei den allermeisten Pflanzen ist nun ein solcher inäquipolarer Aufbau des Gesamtkörpers vorhanden, man kann einen apikalen Sproß- und einen basalen Wurzelpol unterscheiden, und die Entwickelungsphysiologie hat zu untersuchen, worauf diese Polarität beruht, ob sie von außen induziert wird, oder ob eine inhärente polare Struktur der Zellen zugrunde liegt, und ob die Polarität labil oder stabil, ob sie umkehrbar ist oder nicht.

Ob es apolare Zellen überhaupt gibt, ist zweifelhaft. Pfeffer bezeichnet die kugeligen radiären Pleurococcuszellen als apolar. Es ist indessen zu bedenken, daß auch diese zeitweise polar ausgebildet sind; kurz vor und während der Teilung sind sie äquipolar, und die jungen Tochterzellen, solange sie noch miteinander in Zusammenhang stehen, sind inäquipolar gebaut. Unter diesen Umständen wäre es denkbar, daß die Zellen eine innere Polarität besäßen, die im Kugelstadium zwar nicht zum Ausdruck käme, sich aber bei der Teilung etwa darin äußerte, daß die Tochterzellen sich in derselben Richtung wie die Mutterzelle teilten. Stahl fand, daß in den Sporen von Equisetum, die an sich genau rund sind und keinerlei Andeutung einer polaren Struktur erkennen lassen, sich bei der Keimung die Achse der Kernspindel in die Richtung des einseitig einfallenden Lichtes einstellt; die dem Licht zugewendete größere Tochterzelle stellt die erste Prothalliumzelle dar, die kleinere an der Schattenseite wird zu einem Rhizoid. Damit ist die Prothalliumachse bestimmt, wie Stahl meint, in der vorher indifferenten Spore dadurch, daß die vorher um den Mittelpunkt der Spore gleichmäßig verteilten Plasma- und Kernbestandteile unter dem Einfluß des Lichtes eine Sonderung und bestimmte Verteilung erfahren.

Darnach wären also auch die Equisetumsporen apolare Zellen, und erst durch den einseitig wirkenden äußeren Faktor würde in ihnen die Polarität erzeugt. Doch kann sie sehr wohl auch hier schon vorher vorhanden, wenn auch äußerlich für uns nicht erkennbar sein, da durch die einseitige Lichtwirkung einfach eine Einstellung der Organisationsachse parallel zum Lichtstrahle zu erfolgen brauchte, um das experimentelle Resultat verständlich zu machen. Für diese Auffassung spricht, daß die Sporen auch im Dunklen keimen, des einseitigen Wirkens eines Außenfaktors also nicht benötigen, um die Polarität in Erscheinung treten zu lassen. Daß von dieser vor der Keimung nichts erkennbar ist, spricht nicht gegen ihr Vorhandensein. Denn bei den Eiern der Fucacee Cystosira barbata, die sich bei einseitiger Belichtung genau so verhalten wie die Equisetumsporen, wird die Teilungsrichtung schon durch vierstündige Dauer der einseitigen Beleuchtung unverrückbar festgelegt, obwohl dann äußerlich noch nicht die geringste Polarität der Struktur zu erkennen ist und die Teilung selbst erst etwa 12 Stunden später vor sich geht (Winkler). Vorübergehend einseitig belichtete Cystosira-Eier besitzen also nachweislich eine bestimmte polare Organisation, obwohl sich an ihnen keine entsprechenden Strukturverschiedenheiten erkennen lassen. Also können auch sonst äußerlich apolare Zellen sehr wohl inhärent polar organisiert sein. Alle Angaben über Beeinflussung der Polarität durch Außenfaktoren lassen sich jedenfalls sowohl mit der Annahme einer ursprünglichen Apolarität wie mit der einer vorhandenen Polarität vereinigen: im ersteren Falle würde der Außenfaktor polaritätserzeugend wirken, im letzteren nur richtend.

Welche von beiden Auffassungen zutrifft, hat sich noch in keinem Falle entscheiden lassen. Auch nicht für die höheren Pflanzen, bei denen die Polaritätserscheinungen vor allem durch Vöchting eingehend untersucht worden sind. Bei ihnen spielt die Polarität eine sehr wesentliche Rolle bei der Gestaltung und Organbildung. Man wurde auf sie erst recht aufmerksam bei der Verfolgung der Restitutionserscheinungen (vgl. Abschnitt 3, S. 662ff.), weil sie dabei besonders deutlich zutage tritt. Doch ist das eben nur deswegen der Fall, weil sie an der unverletzten Pflanze schon vorhanden ist und bei der normalen Organbildung und Organanordnung mitwirkt. Das zeigt sich im allgemeinen darin, daß die Knospen und Zweige nach der Spitze der Triebe zu gefördert sind,

Digitized by Google

während nach der Basis zu die Bildung von Seitenknospen ganz unterbleibt oder die angelegten Knospen nicht zu Trieben auswachsen; umgekehrt erfolgt die Wurzelbildung (z. B. bei den Getreidearten) vorwiegend oder ausschließlich an den unteren Stengelteilen.

Es kann kaum bezweifelt werden, daß die solchergestalt zum Ausdruck kommende Polarität der höheren Pflanzen zurückzuführen ist auf die Polarität der Zellen, aus denen sie aufgebaut sind. Besonders aus den Transplantationsversuchen Vöchtings geht hervor, daß jede einzelne Zelle in der Längs- und in der Radialrichtung polar gebaut ist. Da alle diese Zellen aber in letzter Linie aus den Meristemen der Vegetationspunkte hervorgehen, so entsteht die Frage: sind die Meristemzellen der höheren Pflanzen apolar oder polar gebaut?

Die erstere Ansicht wird vor allem von Klebs, die letztere von Vöchting vertreten; eine mittlere Ansicht, die wohl das Richtige trifft und als eine Modifikation der Vöchtingschen anzusehen ist, vertritt Pfeffer. Darnach sind die Meristemzellen zwar an sich polar, aber „labil“ polar, und es wird ihnen durch das mit ihnen in Verbindung stehende, stabil polare, ausgebildete Gewebe immer erst wieder der polare Bau aufgeprägt. D. h. also, die Meristemzellen sind polar, aber die Richtung der Polaritätsachse ist in ihnen noch leicht durch Außeneinflüsse verschiebbar. Bei den älteren Zellen ist das dagegen nicht mehr so leicht oder auch gar nicht mehr möglich Mit dieser Unterscheidung einer labilen und einer stabilen Polarität scheinen in der Tat alle vorliegenden Erfahrungen verständlich zu sein. So die Tatsache, daß in manchen Fällen Vegetationspunkte von Wurzeln zu solchen von Sprossen werden können (z. B. bei Anthurium longifolium nach Göbel, bei Rumex acetosella nach Beijerinck), während ganz allgemein die Polarität älterer Stengel und Wurzeln sich durch Umkehrung und sonstige experimentelle Behandlung nicht mehr verändern läßt. Auch das Verhalten der Pflanzen bei der Restitution stimmt gut dazu.

Wie die Polarisierung der Meristemzellen durch die differenzierten Gewebe und die stabile Polarisierung der letzteren erfolgt, läßt sich natürlich nur vermuten. Kniep hat die Ansicht ausgesprochen, es geschähe durch chemische Einflüsse und zu ihrer Unterstützung angeführt, daß in der Nähe von Thallusstücken keimende Fucus-Eier sich durch chemische, von den Thalluszellen ausgehende Einflüsse in ihrer Polarität beeinflussen lassen. Nach Göbel hängt die Polarität zusammen mit der Wanderungsrichtung bestimmter Baustoffe, die sich nach bestimmten Vegetationspunkten hin bewegen; er äußert sich nicht darüber, ob die Zellen hier polar oder apolar seien. Man kann im Sinne seiner Anschauung sagen, daß die labil polarisiert vom Vegetationspunkt kommenden Zellen dadurch stabil polarisiert würden, daß bestimmte Stoffe sie immer in bestimmter Richtung durchströmten. Ziemlich sicher ist jedenfalls, daß die stabile Polarisierung nicht in erster Linie durch äußere Faktoren, von denen vor allem an die Schwerkraft zu denken wäre (Sachs), bewirkt wird, wie vor allem Vöchting gezeigt hat (weiteres im Abschnitt 3).

Wir nehmen also an, daß allen pflanzlichen Zellen eine ursprüngliche Polarität zukommt. Diese ist zunächst labil, wird aber durch richtende Reize mehr oder weniger fest stabilisiert. Als solche Reize kommen für freilebende Zellen einseitig wirkende äußere Faktoren, für Zellen, die sich im Gewebeverbande befinden, solche in Betracht, die von den Zellen der Umgebung ausgehen.

Wodurch ursprünglich in den Zellen die Polarität determiniert wurde, wissen wir nicht. Ob bei der phylogenetischen Ausbildung der Polarität Schwerkraftwirkungen, Lichteinflüsse usw. mitgewirkt haben, läßt sich nicht einmal vermuten. Nicht viel gewonnen ist mit dem Versuche, die Polarität der Zellen auf eine solche des Zellkernes zurückzuführen (Giesenhagen). Denn erstens bliebe dann diese zu erklären, und zweitens ist eine Polarität des Kernes in den meisten Fällen nicht direkt nachweisbar, und wo sie kenntlich ist, durch die polare Anordnung gewisser Organe des Kernes, hat sie nachweislich (Němec) keine prinzipielle Bedeutung für die Richtung der Teilung und die Kernstruktur. Manchmal, z. B. bei den Sporenmutterzellen von Marsilia quadrifolia, ist die polare Struktur des Kernes abhängig von dem polaren Bau des Plasmas, nicht dieser von jener (Marquette). Aehnliches gilt von den Zellen im Innern des Antheridiums von Polytrichum (Allen). Und das könnte wohl auch in den Fällen so sein, wo die Kernteilung in bestimmter, aber nicht durch nachweisliche Plasmadifferenzen markierter Richtung erfolgt.

ε) Die Chromosomenzahl und ihre entwickelungsphysiologische Bedeutung. Im allgemeinen pflegen bei denjenigen Pflanzen, die einen deutlich ausgeprägten Generationswechsel besitzen, Gametophyt und Sporophyt sich in ihrer Gestaltung wesentlich zu unterscheiden. Da sie nun auch dadurch voneinander abweichen, daß der erstere die haploide, der letztere die diploide Chromosomenzahl in seinen Zellkernen führt, so könnte man an kausale Beziehungen zwischen der Verschiedenheit

Digitized by Google

der Chromosomenzahl und der Verschiedenheit der Gestaltung denken (Strasburger). Es hat sich indessen herausgestellt, daß beide Erscheinungen nichts direkt miteinander zu tun haben. Denn erstens gibt es Pflanzen, bei denen die beiden Generationen trotz der Verschiedenheit der Chromosomenzahl morphologisch völlig gleich ausgebildet sind (Dictyota dichotoma). Zweitens aber haben sich bei verschiedenen Pflanzen experimentell Gametophyten mit diploider, Sporophyten mit haploider Chromosomenzahl herstellen lassen, die sich in ihren morphologischen Eigenschaften abgesehen von Aenderungen in den Größenverhältnissen der Zellen durchaus nicht von normalen Gametophyten und Sporophyten unterschieden. Bei Laubmoosen gelang es sogar (El. und Em. Marchal), außer Gametophyten mit diploider Chromosomenzahl solche mit tetraploider Chromosomenzahl herzustellen, die ebenfalls die typischen Eigenschaften normaler Geschlechtspflänzchen besaßen. Auch bei Larix decidua bilden sich die Pollenkörner durchaus normal aus, wenn sie im Experiment anstatt der haploiden die diploide oder gar die tetraploide Chromosomenzahl zuerteilt bekommen (Němec). Aus alledem ergibt sich, daß der Chromosomenzahl, sofern mindestens der haploide Satz von Chromosomen vorhanden ist, keine wesentliche Bedeutung für die Gestaltung des Individuums zuzusprechen ist.

ζ) **Das Alter der Zellen und Individuen und seine entwickelungsphysiologische Bedeutung.** Die Ursache des Alterns der Zellen, der Gewebe und der Individuen, des Absterbens und des Innehaltens einer bestimmten Lebensdauer zu erforschen, ist Sache der allgemeinen Physiologie. Doch kommt der Tatsache des Alterns auch entwickelungsphysiologische Bedeutung zu. Das spricht sich darin aus, daß mit dem Alter die Teilungsenergie der Zelle, die Wachstumsintensität der Zellen und Individuen und ihre Reaktion gegenüber äußeren Einflüssen sich verändern können. Ein Zeichen dafür ist schon das Vorhandensein der „großen Periode" des Wachstums bei den Organen und Individuen und der von Sachs unterschiedenen morphologischen Wachstumsphasen. Besonders deutlich tritt es aber bei den Restitutionserscheinungen hervor, daß mit dem Alter in den Zellen und Geweben innere Veränderungen vorgehen, die ihr entwickelungsphysiologisches Vermögen wesentlich beeinflussen: an vielen Organen sind Regenerationsvorgänge nur bis zu einem gewissen Alter möglich, und oft verlaufen sie qualitativ verschieden je nach dem Alter des restituierenden Organes oder Individuums. Auch Gallenbildungen erfolgen im allgemeinen nur dann, wenn der cecidiogene Reiz das pflanzliche Organ in einem bestimmten jugendlichen Entwickelungsstadium trifft.

Es ist ferner eine ganz allgemeine Erscheinung, daß die Gestaltung der Pflanzen in den verschiedenen Lebensaltern verschieden ist. Die Stellung und Form der Blätter, der Verzweigungsmodus, die Ausbildungsweise und Wachstumsrichtung der Seitenzweige usw. sind häufig später ganz anders als in der Jugend, und insbesondere die Blütenbildung erscheint an ein bestimmtes Lebensalter gebunden. Dazu kommen spezielle „Alterserscheinungen", wie etwa die „Storchnestbildung" bei Picea und Abies, das reichliche Auftreten von Wurzelbrut und basalem Stockausschlag usw. (zahlreiche Beispiele für Verschiedenheit der Organbildung auf verschiedenen Entwickelungsstufen gibt Göbel, Organographie S. 121ff.; Experimentelle Morphologie S. 27ff).

Wenn alle diese Gestaltungsvorgänge in Zusammenhang gebracht werden mit dem Alter der Zellen oder Individuen, so ist damit natürlich noch keine Erklärung gegeben, und es bedarf in jedem einzelnen Falle noch der genauen entwickelungsphysiologischen Analyse, ehe entschieden werden kann, ob eine für ein bestimmtes Alter spezifische Formbildung direkt vom Alter abhängt, d. h. von inneren Zustandsänderungen der Zellen und Individuen, oder aber von äußeren Faktoren, die ihrerseits sich mit dem Alter ändern. Da diese jene weitgehend beeinflussen, wird die Entscheidung meistens schwer zu fällen sein.

Wenn z. B. an einer im feuchten Raum wachsenden Wurzel nur in einer ganz bestimmten Entfernung vom Vegetationspunkt Wurzelhaare entstehen, so mag das mit dadurch bedingt sein, daß der für die Auslösung dieses Gestaltungsvorganges nötige Reizzustand in der Zelle erst mit einem ganz bestimmten Alter eintritt. Und auch bei der Gallenbildung und vielen Restitutionsvorgängen dürfte Aehnliches in Betracht kommen. Welche Faktoren hier die Aenderung des inneren Zustandes, die wir eben als „Aelterwerden" bezeichnen, herbeigeführt haben, läßt sich zurzeit nicht sagen.

In anderen Fällen aber lassen sich gewisse Vermutungen aufstellen. Bei dem Lebermoos Marchantia polymorpha läßt sich an den ursprünglich isolateral gebauten Brutknospen die Dorsiventralität des aus ihnen hervorgehenden Thallus durch einseitige Lichteinwirkung bestimmen: das ist 2 bis 3 Tage nach der Aussaat, zu einer Zeit, wo an dem kleinen Sproß eine anatomische Differenzierung noch nicht deutlich hervorgetreten ist, geschehen. Dann aber ist die Dorsiventralität unverrückbar bestimmt, läßt sich also bei späterer Umkehrung der Be-

Digitized by Google

leuchtungsrichtung nicht mehr verändern. Während also die Meristemzellen ganz junger Individuen auf den einseitigen Lichtreiz photomorphotisch reagieren, tun das die Meristemzellen älterer Individuen nicht mehr, es ist also mit dem Aelterwerden des Individuums eine Aenderung des inneren Zustandes der Meristemzellen eingetreten. Nach dem, was im Abschnitt über die Polarität auseinandergesetzt wurde, läßt sich vermuten, daß diese Aenderung zusammenhängt mit der erst durch den einseitigen Lichtreiz und dann durch die Induktion durch die dorsiventralen Thalluszellen erfolgten Stabilisierung der ursprünglich labilen Polarität. Der Einfluß des Alters auf das Reaktionsvermögen der Zellen gegenüber dem gestaltenden Reiz wäre damit zurückgeführt auf die Stabilisierung ihrer Polarität.

Was die Blütenbildung der höheren Pflanzen anbelangt, so muß die Ansicht, sie sei an ein gewisses spezifisches Alter des Individuums geknüpft, als stark erschüttert gelten. Insbesondere Klebs hat mit guten Gründen die Meinung verfochten, daß die Außenwelt entscheidet, ob überhaupt und zu welcher Zeit und in welchem Grade die Fortpflanzung an Stelle des vegetativen Wachstums tritt. Ob seine Ueberzeugung, daß eine quantitative Steigerung der Konzentration organischer Stoffe mit allen ihren physikalischen und chemischen Folgen eine wesentliche Rolle beim Uebergang vom Wachstum zur Fortpflanzung spielt, begründet ist, müssen weitere Untersuchungen entscheiden. Sicher aber ist, daß in recht vielen Fällen unter dem Einfluß gewisser äußerer Bedingungen der Eintritt der Blühreife sich als unabhängig vom Alter der Pflanze erwiesen hat (zahlreiche Beispiele bei Diels, Jugendformen und Blütenreife. Berlin 1906). Das gilt ganz allgemein, also nicht nur für die höheren Pflanzen und ihre Blüten, sondern auch für die Algen und Pilze und ihre Fortpflanzungsorgane.

Wenn hier also das Alter als solches offenbar keine wesentliche formbestimmende Rolle spielt, so gilt das in erhöhtem Maße von den Alterserscheinungen, die sich als Habitusänderungen an alternden Bäumen beobachten lassen. Das allmähliche Abnehmen des Höhenwachstums, die Internodienstauchungen, das Zurückbleiben der Hauptachse zugunsten der Seitenzweige und andere Momente, die an diesen Habitusänderungen beteiligt sind, beruhen zweifellos nicht auf einer Altersschwächung der Zellen, sondern auf erschwerter Wasser- und Nährstoffzufuhr zu den austreibenden Knospen und anderen ähnlichen sich mit der Größenzunahme des Baumes ändernden Faktoren. Denn Stecklinge oder auf jugendliche Unterstämme gepfropfte Zweige solcher Bäume pflegen wieder den Habitus jugendlicher Individuen anzunehmen.

η) Die Korrelationserscheinungen. Korrelationen nennt man allgemein die physiologischen Wechselbeziehungen zwischen den Teilen eines Organismus. Die Entwickelungsphysiologie hat es naturgemäß nur mit den Korrelationen in der Entwickelung und Gestaltung zu tun, also zu untersuchen, ob und wie die Gestaltung des ganzen Körpers und der einzelnen Organe abhängig ist von den Wechselbeziehungen zwischen den einzelnen Teilen. Da wir einen unmittelbaren Einblick in den Mechanismus der Gestaltung nicht haben, können wir das Bestehen solcher Korrelationen nur indirekt aus Beobachtungen und Experimenten erschließen; dieser Schluß aber muß als so gesichert gelten, daß wir die Korrelationen geradezu als einen der allerwichtigsten inneren Formbildungsfaktoren bei der normalen Ontogenese bezeichnen können.

Experimentell kann man hier zunächst entweder in der Weise vorgehen, daß man ein bestimmtes Organ durch Abschneiden oder auch nur Wachstums- oder Funktionshemmung aus dem Gesamtorganismus entfernt und konstatiert, ob an letzterem gesetzmäßige Entwickelungsänderungen auftreten, die auf eine mitbestimmende Rolle des entfernten Teiles bei der ungestörten Gestaltung schließen lassen, — oder so, daß man ein bestimmtes Organ nach seiner Trennung vom Gesamtkörper isoliert weiterkultiviert und feststellt, ob es, dem Einflusse der anderen Körperteile entzogen, sich in gesetzmäßiger Weise anders gestaltet als bei ungestörter Entwickelung am Mutterorganismus.

Versuche der ersten Art haben in der Tat ergeben, daß die Ausschaltung eines bestimmten Organes aus der Entwickelung des Körpers dessen Gestaltung gesetzmäßig zu ändern vermag. Dafür lassen sich zahlreiche Beispiele anführen, von denen hier nur einige wenige ausgewählt werden können. — Zunächst können rein quantitative Entwickelungsänderungen (Kompensationen im Sinne von Göbel) erfolgen: nach der Entfernung gewisser Teile werden die gebliebenen größer als normal. Bei der Kultur des Tabaks erzielt man dadurch besonders große Blätter, daß man den Pflanzen die Gipfeltriebe und alle Seitenknospen wegschneidet. Bei verschiedenen Streptocarpus-Arten, deren zwei Keimblätter sehr ungleich groß werden, entwickelt sich der normal klein bleibende Kotyledo zur Größe des normal größeren, wenn dieser frühzeitig abgeschnitten oder auch nur sein Wachstum durch Eingipsen unmöglich gemacht wird (Hering). Bei Vicia faba (nicht aber z. B. bei Phaseolus multiflorus) erfahren die an sich nicht stark entwickelten

Digitized by Google

Nebenblätter eine bedeutende Vergrößerung, wenn die Anlage der Blattspreite möglichst frühzeitig entfernt wird (Göbel). Bei vielen höheren Pflanzen hat das Wegschneiden aller Blüten und Früchte eine erheblich kräftigere Entwickelung der vegetativen Teile zur Folge. Selbstverständlich sind solche Kompensationen des Wachstums nur möglich, insoweit die Ausschaltung noch nicht schädigend wirkt; wenn zuviel für die Ernährung und Erhaltung des Individuums wichtige Teile entfernt werden, so muß natürlich ein Kleinerwerden und Verkümmern des Restes eintreten. Man wird auf Grund dieser Erfahrungen schließen dürfen, daß die normale Größe, die ein Organ am Gesamtorganismus im ungestörten Verlaufe der Entwickelung erhält, sehr wesentlich abhängt von Hemmungs- oder Förderungsreizen korrelativer Art, die von den anderen Organen ausgehen. Zu den quantitativen Korrelationen mögen auch die Fälle gerechnet werden, wo nicht die Größe, sondern die Zahl der sich entwickelnden Organe abhängig von den anderen Teilen des Organismus ist. So kommen an reichblütigen Infloreszenzen (Oenothera biennis z. B.) oft die am oberen Ende des Blütenstandes angelegten Blüten nicht mehr zur Entfaltung; das beruht auf einer korrelativen Einwirkung der unteren bestäubten und sich zu Früchten umbildenden Blüten auf die Infloreszenzspitze; denn wenn die älteren Blüten abgeschnitten werden oder unbestäubt bleiben, so kommen die sonst verkümmernden Blüten zur Entwickelung. Auf ähnlichen Beziehungen mag es beruhen, daß vielfach innerhalb der Frucht nur einige wenige von den vielen vorhandenen Samenanlagen sich zu Samen entwickeln, daß an Jahrestrieben nur eine bestimmte Anzahl von Seitenknospen austreibt usw. Quantitative Korrelationen regeln auch die gegenseitigen Größen- und Entwickelungsverhältnisse des Sproß- und Wurzelsystems: tritt aus irgendeinem Grunde eine schwächliche Entwickelung des Sproßsystems ein, so ist in der Regel eine entsprechend geringere Ausbildung des Wurzelsystems zu beobachten, und das gilt auch umgekehrt. Besonders bei manchen heteroplastischen Pfropfungen zeigt sich das sehr deutlich: wird eine Pflanze mit einer anderen bepfropft, deren Laubwerk erheblich stärker entwickelt ist als ihr eigenes, so kann eine Entwickelung ihres Wurzelsystems über das normale Maß hinaus induziert werden (z. B., nach Laurent, Kohl auf Senf).

Die qualitativen Korrelationen (es ist klar, daß zwischen ihnen und den quantitativen keine scharfe Grenze zu ziehen ist) sind noch mannigfacher. Einen sehr einfachen Fall stellt der Ersatz der verlorenen Hauptwurzel durch eine Seitenwurzel dar; wird die Hauptwurzel entfernt oder auch nur dekapitiert, dann können sich die der Schnittfläche nächstliegenden Seitenwurzeln aus ihrer horizontalen oder geneigten Lage nach abwärts krümmen und in die Wachstumsrichtung der Hauptwurzel einstellen. Das bedeutet aber eine Aenderung der inneren Qualitäten der Seitenwurzeln, die sich nicht nur in der veränderten Reaktion gegenüber der Schwerkraft, sondern auch in veränderter Wachstumsintensität und Verzweigungsweise kundgibt. Ganz analog verhalten sich bei vieler Pflanzen, bei denen morphologische Differenzen zwischen dem Hauptsprosse und den Seitentrieben vorhanden sind, die letzteren nach Entgipfelung der Pflanze; sie nehmen die Ausbildungsform des verlorenen Hauptsprosses an (Picea, Abies und andere Nadelhölzer, junge Phyllanthus-Sprosse, nicht aber z. B. Araucaria excelsa). Dabei ändern sich je nach den Umständen Blattform, Blattstellung und Verzweigung. Es lassen sich aber nicht nur Seitenzweige in Haupttriebe umwandeln, sondern bei Pflanzen, bei denen es verschiedene Sproßkategorien gibt, gelingt es fast immer, durch geeignete Beseitigung gewisser Sproßformen andere in ihrer Gestaltung so zu modifizieren, daß sie abweichend von der Ausbildungsweise, die sie bei ungestörtem Verlaufe der Entwickelung erhalten haben würden, die beseitigten Sproßkategorien ersetzen. So lassen sich Langtriebe in Kurztriebe umwandeln und umgekehrt, Sproßdornen können zu Laubtrieben werden, Laubtriebe zu Ausläufern, Rhizomen, Knollen usw. Entsprechend der ungeheuren Mannigfaltigkeit der pflanzlichen Gestaltung ist hier auch eine sehr große Mannigfaltigkeit von Metamorphosen erzielbar. Allen aber ist gemeinsam, daß die Gestaltung gewisser Sprosse verändert wird, wenn bestimmte Teile des Gesamtorganismus entfernt werden. Daraus aber ist zu schließen, daß das Unterbleiben der andersartigen Ausbildung, also die normale Gestaltung dieser Sprosse beim Vorhandensein der im Experiment beseitigten Teile durch Reize mitbedingt wird, die von diesen Teilen ausgehen, und deren Summe eben wir Korrelation nennen. — Solche qualitative Korrelationen bestehen übrigens nicht nur zwischen verschiedenen Sprossen einer Pflanze, sondern da, wo zwischen den Blättern morphologische Verschiedenheiten vorhanden sind, auch zwischen Blättern. Wenn man z. B. bei dem Farn Onoclea struthiopteris, dessen sporentragende Blätter von den sterilen Laubblättern sehr verschieden gestaltet sind, zu einer Zeit, wo die Sporophylle zwar angelegt, aber noch nicht fertig sind, die sterilen Blätter an einem Jahrestrieb abschneidet, so entwickeln sich statt der Sporophylle entweder Laubblätter oder Mittel-

Digitized by Google

bildungen zwischen beiden Blattformen (Göbel). Bei der Erbse, Pisum sativum, deren Ranken umgebildete Blätter sind, lassen sich die Rankenanlagen durch Entfernung aller Blätter und Teilblätter der Pflanze dazu zwingen, sich als Blättchen auszubilden (Mann).

In allen diesen Fällen wurden bestimmte Teile des Organismus entfernt und aus der gesetzmäßigen Andersentwickelung des Gebliebenen Rückschlüsse auf den Einfluß des beseitigten Teiles auf die normale Formbildung gezogen. Man kann aber auch so experimentell vorgehen, daß man ein Organ aus dem Zusammenhang mit dem Gesamtorganismus herausnimmt und aus seiner Andersentwickelung nach der Isolierung Rückschlüsse auf den Einfluß des Gesamtorganismus auf seine normale Gestaltung zieht. Bei vielen Pflanzen sind die Zellen oder die Organe so lebens- und regenerationskräftig, daß sich derartige Versuche leicht ausführen lassen. Auch aus ihren Ergebnissen muß gefolgert werden, daß die normale Gestaltung jedes einzelnen Organes sehr wesentlich durch Korrelationen mitbestimmt wird, die von den anderen Teilen des Körpers ausgehen.

Einzelne Zellen aus dem Körper der höheren Pflanzen herauszuisolieren stößt auf große technische Schwierigkeiten, und wo es gelungen ist, hat es noch nicht zur Entstehung neuer Individuen aus der Einzelzelle geführt. Doch zeigt das Verhalten der Zellen bei Verwundungen, Restitutionsversuchen usw. mit absoluter Sicherheit, daß wohl in jeder einzelnen Körperzelle eine große Reihe von Entwickelungsmöglichkeiten schlummert, von der im Verlaufe der normalen Entwickelung sich nichts zeigen kann, weil die einzelne Zelle unter der korrelativen Einwirkung der anderen Zellen und des Gesamtkörpers steht. Wäre das nicht der Fall, dann könnte ein vielzelliger, nach dem Prinzip der weitestgehenden Arbeitsteilung aufgebauter Körper, wie es der der höheren Organismen ist, sich gar nicht bilden. Ein solcher kann nur entstehen, wenn sich die Entwickelung der einzelnen Bausteine gegenseitig reguliert, und so müssen wir auch daraus, daß aus jeder einzelnen Meristemzelle (potentiell) alles werden kann, tatsächlich aber immer nur ein ganz bestimmter Teil des Ganzen wird, auf das Bestehen von Korrelationen schließen. Fälle, in denen eine Isolation einzelner Zellen möglich ist, bestätigen diese Auffassung durchaus. Wenn z. B. die Eier von Fucus keimen, so entstehen zunächst zwei Zellen, von denen die eine bei ungestörter Entwickelung den Thallus, die andere das Rhizoidensystem der künftigen Tangpflanze liefert. Wird aber die Rhizoidenzelle abgetötet, so entstehen aus der Thalluszelle neue Rhizoiden (Kniep). Wenn das, solange die Verbindung der beiden Primärzellen erhalten bleibt, nicht eintritt, so kann der nächste Grund nur der sein, daß von der Rhizoidenzelle korrelative Hemmungsreize ausgehen, die das Unterbleiben der Rhizoidenbildung in der Thalluszelle zur Folge haben.

Gleiches ergibt sich aus dem Verhalten isolierter Organe höherer Pflanzen. Isolierte, als Stecklinge behandelte Blätter können Wurzeln und Knospen bilden, sie können größer werden als im Zusammenhange mit der Mutterpflanze und einen höheren Grad der anatomischen Differenzierung erreichen. Die dorsiventralen Seitensprosse von Phyllanthus lathyroides (Göbel) und die unverzweigten Seitenachsen 2. Ordnung der Araucaria excelsa (Vöchting) wachsen als isolierte Stecklinge zu einem Mehrfachen der Länge heran, die sie an der Mutterpflanze erreichen. Isolierte Zweige können Kallus, Wurzeln und Adventivsprosse bilden. Wenn all das im normalen Zusammenhange mit dem Mutterorganismus unterbleibt, so muß das auf Hemmungsreizen beruhen, die von den anderen Körperteilen ausgehen, und wir müssen also wiederum auf die Mitwirkung der Korrelation bei der normalen Gestaltung schließen.

Welcher Art des näheren die Korrelationsreize sind und wie sie vermittelt werden, darein fehlt uns zurzeit der Einblick. Ernährungsänderungen, wie die Umkehr der Wanderungsrichtung gewisser Substanzen, lokale Stauung bestimmter Stoffe, Unterernährung gewisser Teile, Ueberernährung anderer und dergleichen spielen gewiß in vielen Fällen dabei eine Rolle, reichen aber sicher nicht aus zur Erklärung aller Korrelationserscheinungen. Manchmal mögen Funktionsänderungen und funktionelle Reize in Betracht kommen. Wenn z. B. an entblätterten Pflanzen der Stengel chlorophyllreicher wird, mehr Spaltöffnungen ausbildet und seine Rindenzellen pallisadenparenchymartig umbildet, so mag da die Uebertragung der assimilatorischen Funktion der verlorenen Blätter auf den Stengel wesentlich mitwirken (Boirivant).

Aehnliches liegt vor, wenn am Stiel des Primärblattes von Cyclamen nach Eingipsen der Blattspreite Ersatzspreiten gebildet werden (Winkler). Werden Knollenpflanzen an der Ausbildung ihrer Reservestoffbehälter gehindert, so lagern sie ihre Reservestoffe in anderen Organen ab, und so können z. B. bei Oxalis crassicaulis statt der normalen Stengelknollen aus Internodien oder aus Niederblättern Ersatzknollen entstehen (Vöchting). Hier wirken freilich wohl neben der Funktionsänderung noch Ernährungsänderungen und Reize komplizierterer Art mit. — Solche funktionelle

Digitized by Google

Reize spielen offenbar bei der normalen Organ- und Gewebebildung eine sehr große Rolle, und sie wirken z. B. bei der normalen Knollenbildung des Oxalis crassicaulis sicherlich ebenso mit wie bei der Knollenbildung am anormalen Ort, die in Vöchtings Versuchen erzwungen wurde.

ϑ) Die Morphästhesie. Nach der Ansicht mancher Biologen kommt den Organismen eine für ihre Gestaltung in erster Linie maßgebende bestimmte Formreizbarkeit zu, durch die regulativ das Erreichen der definitiven Gestalt des fertigen Organismus erstrebt und bewirkt wird. Noll hat sie Morphästhesie genannt. Von der Form und Haltung des eigenen Körpers, einschließlich der Lage der Körperteile zueinander, sollen Reize ausgehen, die die Gestaltung beherrschen und dirigieren. Es wird damit das Endstadium des ganzen Gestaltungsprozesses als Regulativ der Gestaltungsvorgänge, durch prospektive Kausalität wirkend, angenommen. Solange dieses Endstadium der Formbildung noch nicht erreicht ist, befindet sich der Organismus in einem Reizzustand und erstrebt eine Gestaltungsänderung im Sinne der Annäherung an den Endzustand. Erst mit dessen Erreichung ist der Ruhezustand gegeben. Verletzungen und mechanische Aenderungen der Körperform lösen ebenfalls Formreize aus, deren Wahrnehmung regulative Gestaltungsprozesse zur Wiederherstellung der Normalform zur Folge hat. Die Perzeption dieser Formreize soll ausschließlich in der peripherischen Schicht des Protoplasmas, der Hautschicht, erfolgen, da nur sie in Ruhe ist, während das übrige Protoplasma sich in ständiger langsamer Bewegung befindet. Vermittelt wird die Morphästhesie durch Oberflächenkräfte; die Formverhältnisse des Organismus äußern sich bei nackten Protoplasten ohne weiteres als Spannungen der Oberflächen, als Formspannungen, bei behäuteten als Kohäsionsspannungen innerhalb der Hautschicht. Erst im Endzustande der Gestaltung erreichen diese Formspannungen einen gewissen Ruhezustand, und dann erlöschen ihre Reizwirkungen.

Positive Tatsachen, die zwingend zur Annahme eines solchen dirigierenden Innenfaktors der Gestaltung führten, liegen zurzeit nicht vor; was Noll und andere dafür vorgebracht haben, ist wohl auch durch Herbeiziehung anderer Faktoren erklärbar.

3. Von den Restitutionserscheinungen. Als Restitution bezeichnet man ganz allgemein die Wiederbildung verlorener Organe oder Organteile; da manchmal eine Restitution schon eintritt, wenn ein Organ nicht abgetrennt, sondern nur seine Funktion im Dienste des Organismus verhindert wird, kann man vielleicht noch umfassender sagen: Restitution ist der Ersatz ausgeschalteter Organe oder Organteile. Bei dieser allgemeinen Fassung des Begriffes muß auch manche im normalen Verlauf der Entwickelung vorkommende gestaltliche Tätigkeit als Restitutionserscheinung aufgefaßt werden, so etwa der Ersatz der durch das sekundäre Dickenwachstum abgesprengten Epidermis durch Kork und Borke, der Ersatz des verkernten Holzes durch Jungholz, der Ersatz der abgeworfenen Blätter durch neue usw. (physiologische Restitution Delages). Aber die meisten Pflanzen können nicht nur Organe, die im natürlichen Entwickelungsgang ausgeschaltet werden, durch Ersatzbildungen ersetzen, sondern auch auf die abnorme Ausschaltung von Organen durch irgendeinen Faktor der Außenwelt mit Wiederbildung des Ausgeschalteten reagieren (pathologische Restitution Delages). Diese letztere Art der Restitution soll uns in diesem Abschnitte beschäftigen.

Nach der Art und Weise, wie die Restitution vor sich geht, kann man zwei Modalitäten unterscheiden: 1. die Reparation, d. h. die selbsttätige Wiederherstellung des hinweggenommenen Teiles von der Wundfläche aus, derart, daß eine vollständige restitutio ad integrum zustande kommt, und 2. die Regeneration, d. h. den Ersatz des Ausgeschalteten durch Auswachsen vorhandener Anlagen oder adventive Neubildungen. Weitaus die Mehrzahl der pflanzlichen Restitutionen fallen unter die letztere Kategorie, Reparationen sind verhältnismäßig selten. Es liegt aber in der Natur der Sache, daß eine scharfe Grenze zwischen beiden Formen der Restitution nicht immer zu ziehen sein wird.

3a) Die Tatsachen der Restitution. α) Reparation, d. h. adäquate Neubildung des Verlorenen von der Wundstelle aus. Reparation ist zunächst bei einigen einzelligen Algen beobachtet worden, z. B. bei Bryopsis muscosa (Winkler) und Dasycladus clavaeformis (Figdor), zwei Siphoneen. Bryopsis trägt auf einem stielrunden Thallusteil oben einen gefiederten Sproßteil, unten ein verzweigtes Rhizoidensystem; wird der Sproßteil abgeschnitten, so entsteht von der Wundfläche aus alsbald ein neuer, so daß nach einigen Tagen das Pflänzchen von einem unverwundet gebliebenen nicht zu unterscheiden ist. Entsprechend wird auch der Rhizoidenteil nach seiner Abtrennung repariert. Auch Dasycladus bildet den abgeschnittenen wirtelig verzweigten Sproßpol von der apikalen Schnittfläche aus nach. Dafür, daß auch einzelne Zellen höherer Pflanzen nach Verlust eines Teiles diesen durch Reparation ersetzen können, läßt sich eine Beobachtung von Küster anführen, wonach ein Brennhaar

Digitized by Google

von Urtica dioica, an dem das Köpfchen abgebrochen war, von der Bruchstelle aus eine neue Haarspitze nachbildete.

Unter den Pilzen findet sich echte Reparation z. B. an jungen Hüten des Champignons, Agaricus campestris (Magnus) und an sterilen Sprossen von Xylaria arbuscula, an denen die abgeschnittene Spitze so vollkommen repariert wird, daß bald der Ort der Verwundung nicht mehr zu erkennen ist (Köhler). Bei Laubmoosen hat Correns die Reparation verletzter Brutkörper von Drepanophyllum und Eriopus beschrieben.

Farne und Phanerogamen sind einer Reparation, wenn überhaupt, nur fähig, wenn noch ganz junges embryonales Gewebe verwundet wird. So ergänzen sich Farnprothallien nach Längsspaltung wenigstens in ihrem vorderen Teile zu ihrer ursprünglichen Form (Göbel), und im übrigen ist die Reparationsfähigkeit auf die Vegetationspunkte beschränkt. Besonders eingehend untersucht ist die Reparation des Wurzelvegetationspunktes der Phanerogamen (Cisielski, Prantl, Simon, Lopriore, Němec); doch kann auch der Sproßvegetationspunkt nach Abtragung der apikalen Zellschichten oder bei Längsspaltung repariert werden, so bei Helianthus annuus (Peters) und Populus nigra (Reuber). Wenn bei solchen Spaltungen von Vegetationspunkten jugendliche Blattanlagen verletzt werden, so kann auch bei ihnen mehr oder weniger vollkommene Reparation der Blattspreite eintreten. Den wenigen Tatsachen, die uns zurzeit hier bekannt sind, werden sich vermutlich zahlreiche weitere anreihen lassen.

Bis zu einem gewissen Grade mit der echten Reparation von Organen verwandt sind die reparativen Ersatzgewebebildungen, wie sie sich im Gewebeverbande dann einstellen können, wenn aus irgendwelchem Grunde gewisse Gewebeteile verloren gehen. So treten z. B. bei Orobanche beim Eindringen des Parasiten in die Wirtspflanze häufig Verletzungen auf, die durch das reparationsfähige Rindengewebe bald wieder ausgefüllt werden (Koch); bei Hamamelis virginiana beobachtete Shoemaker, daß in der Anthere die Spiralzellenschicht aus irgendeinem Grunde zerstört war: über dieser Stelle hatte sich die sonst einschichtige Epidermis geteilt und nach innen zu eine neue Lage von Spiralzellen gebildet. Aehnliche reparative Vorgänge mögen weit verbreitet sein; auch für sie aber wird mehr oder weniger die Vorbedingung erfüllt sein müssen, daß die Zellen, denen die Aufgabe der Reparation, d. h. des Gewebeersatzes ohne vermittelnde Callusbildung, zufällt, noch relativ jung sein müssen.

β) Regeneration, d. h. Ersatzbildung durch Auswachsen vorhandener Anlagen oder adventive Neubildungen. Zwischen den beiden Modalitäten der Regeneration, der Ersatzbildung durch das Austreiben schon vorhandener Anlagen, und der durch adventive Neubildungen läßt sich eine scharfe Grenze kaum ziehen; sie sollen daher hier zusammen behandelt werden.

Die Algen haben eine ziemlich weitgehende Regenerationsfähigkeit. Zahlreiche Beispiele dafür sind zusammengestellt bei Oltmanns (Morphologie und Biologie der Algen. 2. Band, Jena 1905, S. 244 ff.; daselbst auch Literaturangaben). Hier sei nur erwähnt, daß beide Modalitäten der Regeneration vorkommen. Vorgebildete Knospen treiben aus und ersetzen den verlorenen Gipfeltrieb z. B. bei Chara. Adventivsprosse besorgen das gleiche z. B. bei den Fucaceen. In vielen Fällen geht, auch bei hochdifferenzierten Algen, die Regenerationsfähigkeit so weit, daß jede einzelne Zelle des Thallus, von diesem losgelöst, ein ganzes Algenindividuum neu zu bilden vermag.

Pilze, deren Regenerationsfähigkeit neuerdings mehrfach studiert worden ist, verhalten sich ähnlich wie die Algen. Bei Mucoraceen kann aus einer vom Mycel abgetrennten Hyphe ein ganzer Pilz neu entstehen (van Tieghem), bei vielen Schimmelpilzen aus jeder einzelnen isolierten Zelle, auch aus solchen, die schon weiter differenziert sind, wie z. B. die Conidienträger von Eurotium herbariorum (Klebs). Auch Teilstücke der Fruchtkörper höherer Pilze, gleichgültig ob sie aus dem Stiel, dem Hut, den Lamellen usw. herausgeschnitten werden, vermögen neues vegetatives Mycel zu erzeugen (Brefeld, Magnus, Köhler, Weir u. a.). Umgekehrt vermögen oft verletzte Fruchtkörper das Verlorene regenerativ nachzubilden; so wird bei Boletus edulis das Hymenium dort, wo es von Schnecken abgeweidet wurde, von neuem erzeugt (Massart), und bei vielen Basidiomyceten ist der dekapitierte Stiel des Fruchtkörpers imstande, den abgeschnittenen Hut durch Adventivhutbildung zu ersetzen (Brefeld, Gräntz, Magnus u. a.). Bei Stereum hirsutum regenerieren die Fruchtkörper das, was ihnen weggeschnitten wird, von der Wundfläche aus; das ist aber keine typische Reparation, da die Zonenbildung der neugebildeten Teile sich nicht an die des alten Fruchtkörpers anschließt (Göbel).

Die große Regenerationskraft der Lebermoose ist schon sehr lange bekannt. N. de Necker (Physiologie des corps organisés. 1775, S. 41 f.) kam schon 1771 auf Grund von Zerschneidungsversuchen an Marchantia polymorpha zu der Ansicht, daß jedes kleinste Teilstück der Lebermosse bei geeigneter Kultur imstande sei, die ganze Pflanze zu

Digitized by Google

regenerieren. Das ist dann später durch sehr eingehende Versuche zahlreicher Forscher bestätigt und genau untersucht worden (Vöchting, Schostakowitsch, Cavers, Kreh u. a.). Es besitzen darnach sämtliche bisher untersuchte Arten der Lebermoose die Fähigkeit der Regeneration, und es sind auch sämtliche Organe der Lebermoose (mit Ausnahme der Antheridien), also Thallus, Stengel, Blatt, Perianth, Archegon, Sporogon, Schuppe, Trichomgebilde und Rhizoid der Regeneration fähig, wenn es auch nicht gelingt, bei jeder Art jedes Organ zur Sproßbildung zu bringen.

Die Regenerationsfähigkeit der Laubmoose beruht vor allem auf dem Vorhandensein zahlreicher ruhender Astknospen und einer Fülle von Brutorganen, die normalerweise im Dienste der ungeschlechtlichen Vermehrung stehen. Doch kommt noch ein weiterer Typus der Regeneration insofern vor, als sich manche Arten als befähigt erweisen, aus isolierten Blatt- oder Stengelteilen, ja sogar aus Rhizoiden, Protonema zu bilden, an dem dann wie an normal aus Sporen entstandenem Protonema neue Pflänzchen gebildet werden. Bemerkenswert ist, daß solche Protonemabildung auch an isolierten Teilen des Sporophyten erfolgen kann (Pringsheim, Stahl), ja, daß aus so erzeugtem Protonema sogar Gametophyten hervorgehen können (Marchal) (zahlreiche Angaben über Regeneration bei Laubmoosen finden sich bei Correns, Vermehrung der Laubmoose. Jena 1899).

Daß die Prothallien mancher Farne nach Verwundung der Vegetationspunkte reparationsfähig sind, wurde schon erwähnt. Es ist aber bei ihnen oft auch die Befähigung zur Erzeugung von Adventivprothallien da, z. B. bei Equisetum, und, was besonders wichtig ist, bei verschiedenen Formen auch die Befähigung zur Bildung von Sporophyten aus vegetativen Zellen des Prothalliums (Apogamie). In gewissem Sinne muß auch das als Regenerationserscheinung aufgefaßt werden. — Bei den Sporophyten kann das Umgekehrte vorkommen: isolierte Blätter können anstatt neue Sporophyten Gametophyten regenerieren, also Prothallien, so z. B. Pteris longifolia (Göbel), wobei also unter gänzlicher Ueberspringung der Sporenbildung direkt aus Oberflächenzellen des Sporophyten die Geschlechtsgeneration entsteht (Aposporie). Das gilt aber nur von den Primärblättern, die Wedel älterer Farne regenerieren in allen diesen Fällen überhaupt nicht. Bei anderen Farnen werden aber an isolierten Primärblättern Sporophyten regeneriert, so bei Lycopodium inundatum, Polypodium aureum u. a., in noch anderen Fällen treten Zwischenbildungen zwischen Farnblättern und Prothallien auf. Aeltere Farnblätter tragen vielfach normal, also schon an der Mutterpflanze, auf der Wedelspreite Adventivknospen, mit deren Hilfe sie natürlich regenerieren können, so z. B. bei Asplenium bulbiferum, wo die blattbürtigen Sprosse an der Basis der Fiedern stehen, und Adiantum Edgeworthii, wo sie aus der Spitze der Blätter hervorgehen; in allen solchen Fällen erfolgt die Anlage der Adventivknospen aus embryonalem Gewebe, solange das Blatt oder seine Spitze noch in meristematischem Zustande sich befinden. Es gibt indessen auch einige Farne, deren ältere Wedel nach dem Abschneiden von der Mutterpflanze aus Epidermiszellen Regenerativsprosse entwickeln können, so einige Arten von Cystopteris (Heinricher). Bei der Regeneration von Stengelteilen der Farne scheint es sich meistens auch nur um das Austreiben vorher schon vorhandener ruhender Anlagen zu handeln; so ist es wenigstens bei Equisetum (Ludwigs). Und auch Sprosse von Selaginella sind höchstens zur Bildung von Adventivwurzeln, nicht aber von Adventivknospen zu bringen (Behrens, Göbel). Doch kommt bei Selaginella eine andere Form der Regeneration vor: an isolierten Stengelstücken können sich die Wurzelträger in beblätterte Sprosse umwandeln (Pfeffer).

Bei den Blütenpflanzen ist die Fähigkeit zur Regeneration in hohem Maße vorhanden. Es gibt wohl nur wenig Arten, denen sie ganz fehlt, weil sie keine Adventivwurzeln bilden können, was natürlich die Vorbedingung einer Regeneration aus irgendeinem Teile einer höheren Pflanze ist. Isolierte Sprosse solcher Pflanzen, bei denen die Möglichkeit der Adventivwurzelbildung nicht vorhanden ist, können nur durch Pfropfen auf eine bewurzelte Unterlage zur Regeneration gebracht werden. Bei den meisten Blütenpflanzen aber können sich abgeschnittene Zweige (Senker, Stecklinge, Ableger, Markotten) bewurzeln, und es treiben dann an ihnen die Achselknospen der Blätter aus. Dabei kann sich der morphologische Charakter des als Steckling benutzten Sprosses ändern, Kurzsprosse können zu Langsprossen, Infloreszenzen zu Laubtrieben werden. Durch immer wiederholte Veranlassung zur Stecklingsbildung können einjährige Pflanzen zu ununterbrochenem vegetativen Weiterwachsen gebracht werden. Die Adventivwurzeln entstehen immer endogen.

In vielen Fällen sind auch knospenlose Teile von Blütenpflanzen regenerationsfähig. Allerdings bleibt, wenn knospenlose Stücke als Stecklinge behandelt werden, die Regeneration insofern häufig unvollständig, als nur Adventivwurzeln entstehen. Doch kommt es oft auch zur Erzeugung von Adventivknospen und damit zu vollständiger Regene-

Digitized by Google

ration. Fast an allen Organen kann das der Fall sein, so bei Wurzeln (Populus, Taraxacum), entknospten Stengeln (Solanum-Arten, Salix), Blättern (Begonia, zahlreiche Gesneraceen), Ranken (Passiflora), Früchten (Opuntia), Blüten (Opuntia, Jussieua). Die Adventivsprosse können exogen oder endogen entstehen, entwickeln sich manchmal auch erst aus Wucherungen von Wundgewebe (Kallus). Endogene Adventivsprosse entspringen wohl immer aus dem Cambium, also aus embryonalem Gewebe; die exogenen aber können ganz oder zum Teil aus durchaus ausgewachsenen Zellen (z. B. der Blattepidermis bei Torenia) entstehen, in welchem Falle die regenerierenden Zellen wieder meristematisch werden, d. h. sich in zahlreiche kleine Zellen fächern, die so groß wie normale Zellen der Vegetationspunkte sind.

3b) Die Abhängigkeit der Restitution von äußeren und inneren Faktoren. *α*) Die Beeinflussung der Lokalisation der Regenerate. Der Ort, an dem der isolierte Pflanzenteil die Regenerate liefert, ist in erster Linie abhängig von einem inneren Faktor, der Polarität (Vöchting). Sie spricht sich darin aus, daß die Organbildung am apikalen (Vegetationspunkt-) Ende einer Pflanzenachse anders ist als am basalen. Wir haben bereits gesehen, S. 653, daß sie bei der normalen Organbildung eine wesentliche Rolle spielt. Noch deutlicher aber zeigt sich ihr Einfluß bei der Regeneration, bei der sie hauptsächlich bestimmt, an welchem Orte die neu entstehenden oder sich weiter entwickelnden Sprosse und Wurzeln sich finden.

Die Polarität der einzelnen Organkategorien der höheren Pflanzen pflegt verschieden zu sein. An Sprossen bilden sich normalerweise die Knospen am apikalen Pole zu Trieben aus, während die Wurzeln am basalen Ende entstehen. Auch knospenlose Stengelteile verhalten sich so, die Adventivknospen treten an ihnen am apikalen Ende, die Adventivwurzeln am basalen auf. Wurzeln verhalten sich normalerweise umgekehrt, bei ihnen erscheinen also die Adventivsprosse am basalen, die Adventivwurzeln am apikalen Pole. Blätter endlich bilden, soweit sie überhaupt einer vollständigen Regeneration fähig sind, sowohl Sprosse als Wurzeln am basalen Ende; doch kommen hier viele Ausnahmen vor; es gibt Blätter, bei denen die Sprosse an beliebigen Punkten der Blattspreite gebildet werden können (z. B. Torenia asiatica), oder wo am basalen Ende ein Adventivwurzelsystem erscheint, auf dem in größerer Entfernung vom Blattstiele Wurzelsprosse entstehen (z. B. Rumex acetosella und andere Pflanzen, an denen normalerweise Wurzelsprosse vorkommen).

Auch bei den niederen Pflanzen findet sich eine entsprechende Polarität. So kommt z. B. bei Hutpilzen dem Hutende des Stieles ein größeres Regenerationsvermögen zu als dem Substratpole, und bei Algen, Moosen und Farnen entstehen im allgemeinen neue Sproßteile am apikalen, neue Rhizoiden am basalen Ende. In Fällen, wo es gelingt, einzelne isolierte Zellen zur Regeneration zu bringen, zeigt sich auch an diesen die Polarität, z. B. bei Cladophora. Doch ist hier die Polarität oft nicht so deutlich ausgeprägt wie bei höheren Pflanzen.

Diese normale Polarität kann nun manchmal bei der Regeneration mehr oder weniger verdeckt werden durch den Einfluß anderer Faktoren, ohne daß es aber bis jetzt gelungen wäre, die Polarität bei einer Pflanze durch die Einwirkung solcher Faktoren umzukehren. Von äußeren Faktoren ist zunächst die Schwerkraft oft bei der Ortsbestimmung der Regenerate mit wirksam. Sie befördert das Auswachsen von Knospen auf der Oberseite von regenerierenden Zweigen, wenn diese in geneigter oder horizontaler Lage gehalten werden, das von Wurzeln auf der Unterseite. Aeltere Angaben über eine vollständige Umkehrung der Polarität bei verkehrt eingepflanzten Zweigen sind unrichtig. Bei einseitiger Wirkung des Lichtes auf restituierende Pflanzen treten sehr oft Wurzeln nur auf der Schattenseite auf, während das Austreiben von Knospen auf der Lichtseite gefördert erscheint; Pilze, z. B. Coprinus-Arten, pflegen unter solchen Bedingungen sämtliche Regenerate auf der Dunkelseite entstehen zu lassen. Wenn die verschiedenen Regionen regenerierender Zweige verschieden feucht gehalten werden, so pflegt die Wurzelbildung an den feuchteren Stellen, die Sproßbildung an den trockeneren gefördert zu sein. An gekrümmten Zweigen treten die Wurzeln vorwiegend oder ausschließlich auf der Konkavseite hervor. Alle solche äußeren Faktoren aber, denen ein gewisser Einfluß auf die Bestimmung des Ortes, an dem die Regenerate erscheinen, zukommt, vermögen bei entsprechender Einwirkung die Polarität höchstens zu verdecken, nicht aber sie zu verändern. – Das gilt auch von inneren Faktoren und ihrem Einfluß auf die Lokalisation der Neubildungen. Es ist klar, daß z. B. an einem Steckling die Polarität sich bei der Wurzelbildung nur dann deutlich geltend machen kann, wenn die innere Disposition zur Wurzelbildung an allen Stellen der Sproßachse annähernd gleich ist. Oft ist das aber nicht der Fall; bei vielen Pflanzen sind die Knoten allein oder vorzugsweise zur Wurzelproduktion befähigt. Wenn man den Steckling einer solchen Pflanze so zurechtschneidet, daß er aus einem Internodium und dem darüber befindlichen Nodium besteht, so wird die Wurzelbildung an seinem

Digitized by Google

oberen Ende stattfinden: aber das wäre natürlich nicht ein Zeichen für mangelnde Polarität. Auch das Alter der zur Restitution veranlaßten Pflanzenteile kann die Deutlichkeit der polaren Anordnung der Regenerate beeinflussen, ebenso die Jahreszeit, zu der die Regeneration stattfindet, und anderes. Immer aber ist daran festzuhalten, daß die typische Polarität durch all das nicht aufgehoben wird, vorausgesetzt, daß sie überhaupt nachweisbar ist. Und das ist bei den allermeisten Pflanzen der Fall, wenn es auch gewisse Ausnahmen geben mag, d. h. Fälle von abweichender Polarität, denn gänzlich apolare Pflanzen dürfte es nach dem früher Besprochenen kaum geben.

β) Die Beeinflussung der Qualität der Regenerate. Die Qualität der regenerativen Ersatzbildungen richtet sich vor allem danach, was dem regenerierenden Teil zur Ergänzung zu einem vollständigen Individuum fehlt. Es wird also in der Regel das ersetzt, was ausgeschaltet worden ist. Sofern überhaupt eine vollständige Regeneration stattfindet, bilden demgemäß isolierte Zweige Adventivwurzeln, isolierte Wurzeln Adventivsprosse, isolierte Blätter und knospenlose Stengelstücke Adventivsprosse und -wurzeln. Sehr häufig indessen ist das Restitutionsvermögen einzelner Teile unvollständig. So sind vor allem viele Blätter höherer Pflanzen nur zur Wurzelbildung, nicht aber zur Sproßerzeugung befähigt, und auch viele Zweige können sich zwar nach der Isolierung zu ganzen Individuen ergänzen dadurch, daß sie Adventivwurzeln bilden und die an ihnen vorhandenen Knospen austreiben lassen, sind aber nicht imstande, Adventivsprosse zu erzeugen und sterben daher trotz guter Bewurzelung ab, wenn ihnen ihre Knospen ausgeschnitten werden.

Von der Regel, daß bei der Restitution der Ersatz dem Verlorenen an Form und Lebenserscheinung wesentlich gleich ist, sind bei Pflanzen bis jetzt nur ganz wenig Ausnahmen bekannt, Fälle also, wo an Stelle der ausgeschalteten Organe typisch andere regeneriert werden (Heteromorphose). Wird der marinen Siphonee Bryopsis muscosa der Rhizoidenteil abgeschnitten, so gelingt es, die basale Schnittfläche des Stämmchens zur Regeneration eines Fiederteiles zu veranlassen dadurch, daß man sie intensiver Beleuchtung aussetzt; umgekehrt kann die apikale Schnittfläche anstatt einen neuen Fiederteil ein Rhizoidensystem regenerieren, wenn sie verdunkelt wird; werden Spitzenteil und Wurzelteil beide vom Stiel getrennt, so bildet dieser bei intensiver Belichtung an beiden Enden neue Fiedern aus (Winkler). Auch bei der Siphonee Dasycladus clavaeformis regeneriert die basale Schnittfläche bei entsprechender Versuchsanstellung einen neuen Sproßteil (Wulff). Bis zu einem gewissen Grade hierher gehört auch die Tatsache, daß die isolierten Primärblätter mancher Farnkeimlinge nicht Adventivsprosse von Sporophyten, sondern Adventivprothallien erzeugen (Göbel).

Ueber die Organkategorie, der das Regenerat angehört, entscheidet also, von den erwähnten Ausnahmen abgesehen, der Umstand, welche Organkategorie dem regenerierenden Individuum genommen worden ist. Die nähere Qualität des Regenerierten, insbesondere die Ausgestaltung der Ersatzsprosse, hängt wesentlich ab von dem Zustande, in dem sich die Mutterpflanze zur Zeit der Regeneration befindet. Das zeigt sich besonders deutlich in dem Verhalten der Sprosse, die von Blattstecklingen erzeugt werden. Blätter von blühreifen Begonien, zur Regeneration ausgelegt, bilden Adventivsprosse, die schon in der Achsel der ersten Blätter Infloreszenzen anlegen, während Adventivsprosse von Blättern noch nicht blühreifer Pflanzen erst sehr viel später zur Blüte kommen (Sachs). Die gelappten Folgeblätter von Passiflora coerulea erzeugen Adventivsprosse, die früher zur Bildung von Folgeblättern übergehen als Adventivsprosse, die aus den einfachen ungeteilten Primärblättern derselben Pflanze entstanden sind (Winkler). An Blattstecklingen von Achimenes und anderen Gesneraceen bilden sich Adventivsprosse, die früher oder später blühen, je nachdem sie der Blütenregion oder der blütenlosen Basis junger Laubtriebe entnommen wurden; entnimmt man aber die Blätter für den Regenerationsversuch einer Pflanze gegen das Ende ihrer Vegetationsperiode, so entstehen als Adventivsprosse Zwiebelknöllchen, also Ueberwinterungsorgane, wie sie an der ungestörten Pflanze normal als Abschluß der jährlichen Entwickelung entstehen (Göbel). Dieser Einfluß des Zustandes der Mutterpflanze auf das Verhalten ihrer Organe bei der Regeneration kann so weit gehen, daß mit der Erreichung eines gewissen Entwickelungszustandes der Mutterpflanze die Regenerationsfähigkeit ihrer Organe völlig erlischt. So können abgeschnittene Primärblätter von Lycopodium inundatum Adventivsprosse liefern, die Blätter älterer Pflanzen nicht mehr, und auch bei Cyclamen persicum können nur die ersten 2 bis 3 Blätter des Keimlings die abgeschnittene Blattspreite durch Bildung von Adventivspreiten aus dem Blattstiel ersetzen (Hildebrand, Winkler, Göbel).

Für die Regenerativsprosse derjenigen Pflanzen, bei denen die ersten Blätter der Keimpflanze morphologisch anders ausgebildet sind als die Folgeblätter, gilt allgemein der Satz, daß sie in ihrer Organbildung sich wie die Keimpflanzen verhalten, zuerst also

Digitized by Google

Jugendblätter und erst dann Folgeblätter tragen (Göbel, de Candolle), wobei freilich bei den Adventivtrieben häufig das Folgeblattstadium relativ bälder erreicht wird, als bei den Keimblättern. Ohne weiteres ist verständlich, daß Deformationen, durch die mechanischen Verhältnisse an der Ursprungsstelle der Regenerate bedingt, nicht selten an jungen Adventivgebilden zu beobachten sind (Blattasymmetrien, Anisophyllie, Verbänderungen usw.).

γ) Die Bedingungen der Restitution. Vorbedingung aller Restitution ist das Vorhandensein der Befähigung zur Restitution; diese ist aber keineswegs eine allgemeine Eigenschaft der Organismen. Wenigstens kennen wir viele Pflanzen und Tiere, die sich bisher auf keinerlei Weise zur Restitution haben bringen lassen. Natürlich ist es nicht ausgeschlossen, daß auch diese Organismen unter anderen Bedingungen doch restituieren, und da die Behauptung, es gäbe restitutionsfähige Organismen, immer nur auf den negativen Ausfall von mit ihnen angestellten Experimenten gegründet werden kann, so kann sie niemals mit apodiktischer Gewißheit ausgesprochen werden. Doch ist es wohl wahrscheinlich, daß es in der Tat zur Restitution nicht befähigte Pflanzen gibt, da wir sehen, daß die Regenerationsfähigkeit selbst bei ein und demselben Individuum örtlich und zeitlich verschieden ist. Es gibt Pflanzen, bei denen z. B. die Wurzeln leicht restituieren, nicht aber die Blätter (Populus, Taraxacum), andere, bei denen die Blätter, nicht aber die Sproßinternodien oder Wurzeln restituieren (Torenia), wieder andere, bei denen die Blätter sehr viel rascher und sicherer regenerieren als die Sprosse (Begonia). Und auch die einzelnen Gewebe und Zellen der restituierenden Organe haben keineswegs alle den gleichen Grad der Restitutionsfähigkeit. Zeitlich ändert sich im Verlaufe der Entwickelung bei den Pflanzen gewöhnlich die Restitutionsfähigkeit insofern, als sie im embryonalen Zustande oder in der ersten Jugendzeit am stärksten zu sein pflegt und mit dem Alter abnimmt. So können junge Rhizoiden von Chara sich zu Zweigvorkeimen umbilden, ältere nicht mehr (Giesenhagen); bei vielen Farnen restituieren nur die Primärblätter der Keimpflanzen; für die Spreitennachbildung bei Cyclamen gilt das gleiche usw. Wenn also graduelle Abstufungen in der Befähigung zur Restitution vorhanden sind, dann muß es als wahrscheinlich gelten, daß das Nichtrestituieren vieler Pflanzen und Pflanzenteile in der Tat auf Unfähigkeit zur Restitution beruht. Worauf diese und die verschiedene Verteilung der Restitutionsfähigkeit über die Organe einer und derselben Pflanze zurückzuführen ist, läßt sich zurzeit ebensowenig sagen als sich die Abnahme und der schließliche Verlust der Restitutionsfähigkeit mit dem Alter erklären läßt.

Von äußeren Bedingungen ist die Restitution vielfach in ähnlichem Sinne abhängig wie das Wachstum; Faktoren, die dieses fördern, begünstigen auch den Eintritt und den Vorgang der Restitution. Doch sind die Bedingungen für den Eintritt des Wachstums und den der Restitution keineswegs in allen Fällen identisch. So genügen z. B. bei der Spreitenregeneration von Cyclamen niedere Temperaturen, bei denen das Wachstum der Blätter noch sehr gut erfolgt, noch nicht, die Regenerationserscheinungen vor sich gehen zu lassen (Winkler). Die Dauer der Wurzelspitzenreparation ist stark von der Temperatur abhängig (Simon, Němec). Und ähnliches wird vermutlich auch für andere Restitutionen gelten.

Eine wichtige Bedingung für den Eintritt der Restitution ist das Vorhandensein einer gewissen Minimalquantität von Nährstoffen in den restituierenden Pflanzen oder Organen. Begonienblätter, die an sich ja sehr leicht Adventivsprosse bilden, tun dies nicht, wenn sie vor der Trennung von der Mutterpflanze durch Verdunkelung stärkefrei gemacht wurden und gezwungen werden, im Dunklen oder im kohlensäurefreien Raume zu verweilen; ganz albicate Sprosse von Commelina, Panicum, Pelargonium sind unfähig zur Wurzelbildung, während grüne Sprosse oder nur partiell albicate leicht und regelmäßig Wurzeln bilden (Kupfer). Mit dieser Notwendigkeit des Vorhandenseins einer Mindestmenge von Nährmaterial hängt es wohl auch zusammen, daß isolierte Teilstücke, um erfolgreich restituieren zu können, nicht unter eine gewisse Größe sinken dürfen, die natürlich bei den einzelnen Arten spezifisch verschieden ist und experimentell in jedem einzelnen Falle zu finden ist; bei Cochlearia armoracia ist die Grenze an Querscheiben der Wurzel bei etwa 1,5 mm Dicke des restituierenden Stückes erreicht (Rechinger). Es ist indessen natürlich sehr wohl möglich und wahrscheinlich, daß noch kleinere Stücke und selbst isolierte einzelne Zellen restitutionsfähig gemacht werden können, wenn ihnen in geeigneter Weise organische Nahrung von außen zugeführt wird. Darüber fehlen noch Erfahrungen. Es genügen jedenfalls in allen Fällen schon recht geringe Mengen von Nährstoffen, die Restitution einzuleiten, die dann auf Kosten der von den neugebildeten Blättern assimilierten Stoffe weiter geführt wird, wenn Licht und Kohlensäure vorhanden sind.

δ) Die Auslösung der Restitution: der Restitutionsreiz. Da die Restitution der Ersatz ausgeschalteter Organe ist,

Digitized by Google

so ist klar, daß der Restitutionsreiz gegeben sein muß durch die Ausschaltung eines Organes. Ob in den Fällen, wo nach der Organausschaltung keine Restitution erfolgt, nicht doch ein Restitutionsreiz erfolgt, dem nur keine Restitutionsreaktion nachfolgt, wissen wir nicht; sicher ist, daß die im vorigen Abschnitte kurz erörterten Bedingungen erfüllt sein müssen, damit im Gefolge des durch die Ausschaltung eines Organes gegebenen Reizes als Reaktion eine Restitution erfolgt.

Die Organausschaltung ist nun aber ein sehr komplizierter Vorgang, und es erhebt sich die Frage, welche der damit gegebenen Einzeländerungen im besonderen für die Restitutionsauslösung in Betracht kommen.

Zunächst wäre an den Wundreiz zu denken. Doch kann dieser nicht allgemein als restitutionsauslösendes Moment gelten, da es Restitutionen gibt, die ohne irgendwelche Verwundung induziert werden können. So tritt die Regeneration der Blattspreite an den Primärblättern von Cyclamenkeimlingen nicht nur dann ein, wenn die Spreite vom Stiel abgeschnitten wird, sondern unter Umständen auch schon dann, wenn man die jugendliche Spreite eingipst und so am Wachsen und Funktionieren hindert (Winkler). Bei Begonia rex und Utricularia treten Adventivsprosse auf den Blättern nicht nur dann auf, wenn diese abgetrennt werden, sondern auch dann, wenn sie ungestört an der Mutterpflanze gelassen, dieser aber alle Sproßvegetationspunkte genommen werden (Göbel); hier kann man natürlich nicht etwa annehmen, daß der durch das Ausbrechen der Knospen am Stengel erzeugte Wundreiz in die Blätter geleitet würde und hier restitutionsauslösend wirkte.

Solche Restitutionen, die vom Orte der Operation entfernt oder überhaupt ohne irgendwelche vorhergehende Verwundung auftreten, widerlegen auch die Hypothese, der Restitutionsreiz sei gegeben durch die Aufhebung gewisser mechanischer Hindernisse. Insbesondere die Restitution aus einzelnen isolierten Zellen, wie sie sich bei vielen Algen, Moosen usw. erzielen läßt, könnte ja mit dadurch ausgelöst erscheinen, daß für die restituierenden Zellen mit der Lösung aus dem Gewebeverbande gewisse mechanische Wachstumswiderstände aufgehoben würden, die an der intakten Pflanze entwickelungshemmend einwirken. Und die Erscheinungen der Wundheilung, der Kallusbildung, der Gewebereparation und anderes könnte zur Unterstützung dieser Ansicht herbeigezogen werden. Doch zeigen die eben erwähnten Tatsachen, daß die Beseitigung solcher mechanischer Widerstände höchstens als Nebenfaktor ohne wesentliche Bedeutung in Betracht kommen kann.

Mit der Ausschaltung eines Organes, zumal durch eine Verwundung, sind naturgemäß gewisse Veränderungen in den Ernährungsbedingungen gegeben, und es wäre möglich, daß sie als Restitutionsreiz wirkten. Solche Aenderungen können quantitativer und qualitativer Natur sein. Quantitative Ernährungsänderungen können dadurch herbeigeführt werden, daß der Strom von plastischen Nährstoffen, der normalerweise zu dem ausgeschalteten Organe fließt, durch die Setzung einer Wundfläche unterbrochen wird, so daß an dieser eine Stauung von Nährmaterial eintritt. Auch dadurch kann an isolierten Organen eine Stoffanhäufung zustande kommen, daß die Assimilate nach der Unterbrechung des Zusammenhanges mit den anderen Teilen nicht mehr in diese abgeführt werden können, wie z. B. bei Blattstecklingen. — Es mag wohl sein, daß derartige Stoffstauungen manchmal die Restitution fördern und vor allem ihren raschen Eintritt und Ablauf begünstigen; als primärer Restitutionsreiz spielen sie indessen sicher keine Rolle. Für die Reparation der Wurzelspitze konnte Němec direkt erweisen, daß Anhäufung von Nährmaterial an der Wundstelle nicht der Faktor sein kann, der die Reparation auslöst. Auch gibt es Blätter, die, isoliert kultiviert, regelmäßig restituieren, aber im Zusammenhange mit der Mutterpflanze dazu selbst dann nicht zu bringen sind, wenn es in ihnen (durch dauernde Entfernung aller Sproßvegetationspunkte) zu vollständiger Füllung mit Nährstoffen kommt. Vor allem aber gilt bei den Pflanzen für die Beziehung zwischen Organbildung und Ernährung allgemein der Satz, daß die Nährstoffe dahin strömen, wo Organbildung stattfindet, nicht aber, daß das Strömen der Nährstoffe nach bestimmten Punkten als primärer Vorgang daselbst die Organbildung bewirke. Dieser aus der normalen Organbildung abgeleitete Satz dürfte unbedingt auch für die restitutive Organbildung gelten.

Qualitative Ernährungsänderungen treten mehr oder minder stark wohl bei jeder Organausschaltung ein; das Verhältnis zwischen organischer und anorganischer Nahrung kann sich ändern, die Bildung, Speicherung oder Sekretion gewisser Stoffe kann unterbleiben, anormale Stoffwechselprodukte können infolge der Verwundung auftreten usw. Durch all das kann sich die Zusammensetzung des Nährmateriales wie auch seine Verteilung über den Körper wesentlich ändern, und diese Aenderungen könnten den Restitutionsreiz abgeben. Göbel vertritt eine solche Anschauung. Nach ihm erfahren bei der normalen Ontogenese die ursprünglich gleichwertigen Zellen namentlich durch die Verschiedenheit des Baumateriales, das sie erhalten, eine verschiedene Ausbildung, und ent-

Digitized by Google

sprechend kommt bei der Restitution in Betracht, daß durch Unterbrechung des Zusammenhanges mit den Verbrauchsstellen, nach denen bestimmte Baumaterialien im normalen Verlauf der Vegetation sich hinbewegen oder durch Inaktivierung dieser Stellen eine von der normalen abweichende Stoffverteilung zustande kommt. Diese veranlaßt die reaktionsfähigen Zellen zur Restitution, deren Resultat dem jeweils an der betreffenden Stelle vorhandenen Baumaterial entspricht. — Positive Feststellungen solcher chemischer Verschiedenheiten liegen zwar nicht vor; doch ist es wohl sicher, daß sie vorausgesetzt werden müssen, und wohl auch wahrscheinlich, daß sie bei der Determinierung der Qualität des Regenerates eine wesentliche Rolle spielen. Aber dafür, daß sie auch den Anlaß für den Eintritt einer Restitution überhaupt abgeben, fehlen noch alle Anhaltspunkte, und die Annahme ist jedenfalls rein hypothetisch. Und es muß daran festgehalten werden, daß die Faktoren, die die Qualität des Restituierten beeinflussen und bestimmen, keineswegs mit denen identisch sind oder zu sein brauchen, die die Restitution auslösen. Eine solche Identität nimmt auch die Sachssche Theorie der organbildenden Stoffe an, nach der in der Pflanze spezifische wurzel-, sproß-, blatt-, blütenbildende Substanzen entstehen und sich in bestimmten Richtungen bewegen. Bei Sproßstecklingen z. B. sollen sich die wurzelbildenden Stoffe am basalen Schnittende ansammeln, und das ist die Ursache, daß hier eine Restitution von Wurzeln eintritt; die sproßbildenden Stoffe dagegen strömen apikalwärts, häufen sich demgemäß an der oberen Schnittfläche an und bewirken hier restitutive Sproßbildung. So will also die Sachssche Theorie nicht nur die Auslösung der Restitution, sondern gleichzeitig auch die Lokalisation und Qualitätsbestimmung der Regenerate erklären. Doch gibt sie tatsächlich nicht viel mehr als eine Umschreibung der zu beobachtenden Erscheinungen. Wenn erklärt werden soll, warum am basalen Ende eines Stecklings Wurzeln gebildet werden, so ist nicht viel damit gewonnen, daß wir sagen: das geschieht, weil sich dort wurzelbildende Stoffe befinden. Ueberdies ist die Existenz solcher Stoffe durchaus unerwiesen, und sie wird auch dadurch nicht wahrscheinlicher gemacht, daß man, statt von organbildenden Stoffen, von wurzel- und sproßbildenden Enzymen redet (Kupfer). Mit alledem soll nicht geleugnet werden, daß einer Aenderung der typischen Verteilung von Nährstoffen eine gewisse Bedeutung bei der Einleitung von Restitutionsvorgängen wenigstens in manchen Fällen zukommt, aber eine entscheidende Rolle ist diesem Faktor nicht zuzuschreiben.

Am wahrscheinlichsten ist wohl die Annahme, daß die Restitution ausgelöst wird durch Aenderungen in den korrelative Wechselbeziehungen zwischen den Teilen der Pflanze, wie sie mit jeder Organausschaltung naturgemäß gegeben sind. Es bedarf dann natürlich in jedem einzelnen Falle noch der genauen Untersuchung, durch welche spezielle Korrelationsstörung diese oder jene Restitution veranlaßt wird. Die Rolle, die solche Korrelationen für die normale Organbildung und Gestaltung besitzen, wurde schon erörtert, und es ist darnach verständlich, daß die Aufhebung oder Aenderung der normalen Korrelationsverhältnisse bei überhaupt entwickelungs- und restitutionsfähigen Pflanzenteilen eine Andersgestaltung zur Folge haben muß. Für das tiefere Verständnis der Restitution und ihrer Ursachen ist freilich auch mit dieser Unterordnung unter die Korrelation nicht allzuviel gewonnen, und es erhebt sich nun vor allem auch die Frage, wie als Restitutionsreiz wirkenden Korrelationsstörungen nach den restituierenden Stellen hin vermittelt werden.

Darüber wissen wir einiges Positive fast nur hinsichtlich der Reparation des Vegetationspunktes der Wurzelspitze (Simon, Němec). Auf Grund der hier vorliegenden Versuche muß angenommen werden, daß in der ganzen Wurzelspitze durch das Vorhandensein des Vegetationspunktes ein einheitlicher spezifischer Zustand dauernd erhalten wird, daß jedoch ein Reparationsvorgang ausgelöst wird, wenn dieser Zustand durch eine genügend große Unterbrechung der Beziehungen zwischen dem Vegetationspunkt und dem Wurzelmeristem verändert wird. Für die Vermittelung dieser Beziehungen sind nicht alle Zellreihen und Schichten der Wurzelspitze von gleicher Bedeutung, viele von ihnen können durchschnitten werden, ohne daß eine Reparation als Folge der Kontinuitätsunterbrechung auftritt; eine solche erfolgt aber regelmäßig, sobald mehr als die Hälfte des Pericambiums durchschnitten wird. Das Pericambium vermittelt also die Korrelation zwischen Vegetationspunkt und Wurzelmeristem; wird diese Korrelation durch genügend große Kontinuitätsunterbrechung des Perikambiumringes unmöglich gemacht, so tritt die Reparation ein. Warum gerade das Pericambium in Betracht kommt, läßt sich schwer sagen; Göbel vermutet, weil es länger als andere Teile der Wurzelspitze embryonal bleibt und als bevorzugter Leitungsweg dient, in dem die für die Ernährung der Initialen geeigneten Baustoffe nach diesen wandern.

Bei Begonia rex sind es korrelative Beziehungen der Blätter zu den Sproßvegetationspunkten, deren Unterbrechung restitutive Adventivsproßbildung auf den Blättern

Digitized by Google

hervorruft, erfolge nun diese Unterbrechung durch Isolierung der Blätter oder durch Entfernen aller Knospen von der blatttragenden Pflanze (Göbel); es scheint, als ob hier die korrelativen Hemmungsreize durch die Gefäßbündel vermittelt würden, was aber noch der näheren Analyse bedarf. Bei verschiedenen Streptocarpus-Arten werden Restitutionsvorgänge dann ausgelöst, wenn die Korrelation zwischen dem Basalmeristem und den übrigen Teilen des Körpers gestört wird (Němec).

Literatur. *Die Literatur über die pflanzliche Entwickelungsphysiologie ist in zahlreichen Einzelabhandlungen verstreut, die hier nicht alle aufgeführt werden können. Viele davon finden sich in den zitierten Werken von Pfeffer und Jost angegeben. Hier sollen nur einige in Buchform erschienene wichtigere Werke entwickelungsphysiologischen Inhaltes genannt werden, mit deren Hilfe man sich weiter orientieren kann.* — **H. Driesch,** *Die organischen Regulationen. Leipzig 1901.* — **K. Goebel,** *Organographie der Pflanzen. Jena 1898 bis 1901.* — **Derselbe,** *Einleitung in die experimentelle Morphologie der Pflanzen. Leipzig 1908.* — **W. Hofmeister,** *Allgemeine Morphologie der Gewächse. Leipzig 1868.* — **L. Jost,** *Vorlesungen über Pflanzenphysiologie. 2. Aufl. Jena 1908.* — **G. Klebs,** *Willkürliche Entwickelungsänderungen bei Pflanzen. Jena 1903.* — **Derselbe,** *Die Bedingungen der Fortpflanzung bei einigen Algen und Pilzen. Jena 1896.* — **E. Korschelt,** *Regeneration und Transplantation. Jena 1907.* — **E. Kuester,** *Pathologische Pflanzenanatomie. Jena 1903.* — **B. Němec,** *Studien über die Regeneration. Berlin 1905.* — **Derselbe,** *Das Problem der Befruchtungsvorgänge. Berlin 1910.* — **W. Pfeffer,** *Pflanzenphysiologie. 2. Band. Kraftwechsel. Leipzig 1901.* — **J. Sachs,** *Gesammelte Abhandlungen über Pflanzenphysiologie. 2. Band. Leipzig 1898.* — **Derselbe,** *Physiologische Notizen. Marburg 1898.* — **H. Voechting,** *Ueber Organbildung im Pflanzenreich. Band 1. Bonn 1878. Band 2. Bonn 1884.* — **Derselbe,** *Ueber Transplantation am Pflanzenkörper. Tübingen 1892.*

H. Winkler.

Enzyme der Pflanzen.

1. Allgemeine Gesichtspunkte. 2. Enzymproduktion im Zellplasma. 3. Darstellung und stoffliche Eigenschaften. 4. Dynamik der Enzymwirkungen in der Zelle. 5. Spezifische Wirksamkeit der Enzyme. 6. Systematik: a) Kohlenhydrat-Enzyme. b) Fett-Enzyme. c) Glykosid-Enzyme. d) Eiweiß-Enzyme. e) Ammoniak abspaltende Enzyme. f) Kohlensäure abspaltende Enzyme. g) Oxydierende Enzyme. h) Hydrogenasen und Reduktasen. i) Milchsäuregärungs-Enzym.

Da die Verhältnisse der Enzyme bei den Bakterien und den Pilzen in den Artikeln „Bakterien“ und „Gärung“ ihren Platz finden, und die theoretisch-chemische Seite der Enzymologie eine gesonderte Darstellung erfährt (siehe den Artikel „Stoffwechsel“), so verbleibt uns hier im wesentlichen eine physiologische Schilderung der Enzyme und deren Wirkungen im Stoffwechsel der höheren Pflanzen.

1. Allgemeine Gesichtspunkte. Die Enzymwirkungen in der lebenden Pflanzenzelle umfassen die fundamentalsten Vorgänge des Stoffwechsels, wie Aufnahme und Abspaltung der Elemente des Wassers, der Kohlensäure, des Ammoniaks, und sind mit dem Getriebe der chemischen Erscheinungen im lebenden Protoplasma so untrennbar verbunden, daß ein Zellstoffwechsel ohne Enzyme absolut unvorstellbar ist. Wenngleich bislang kein einziges Enzym in reinem Zustande bekannt ist, so besteht doch kein Zweifel, daß die Enzyme zwei wichtige Eigenschaften des lebenden Plasmaleibes teilen, nämlich die kolloide Natur und die Zerstörbarkeit durch höhere Temperaturgrade. Die Oberflächenwirkungen, welche im Chemismus des Lebens eine so bedeutende Rolle spielen, sind auch für die Wirkungen der Zellenzyme von größtem Belang, um auf minimalem Raume einen großen Stoffumsatz zu erzielen. Wir müssen uns die Enzyme auf ausgebreiteten Grenzflächen in sehr dünnen Schichten verteilt denken, um die Intensität der Reaktionswirkungen in lebenden Zellen zu begreifen, und müssen annehmen, daß die verschiedenen gleichzeitig in einer Zelle anwesenden Enzyme durch geeignete Mittel voneinander getrennt gehalten werden.

2. Die Enzymproduktion im Protoplasma. Gerade jene Enzyme, welche die Hauptprozesse des Stoffwechsels, die Atmung, die Assimilation der Nährstoffe, die Absonderungsvorgänge beherrschen, lassen sich in der Regel vom Plasma sehr schwierig oder gar nicht trennen, und wurden erst durch die Methodik der aseptischen Autolyse näher bekannt. Salkowski studierte in der „Selbstgärung der Hefe“ zuerst solche Vorgänge, indem er Hefe unter Chloroformzusatz längere Zeit stehen ließ, und die Veränderungen der Zellsubstanzen unter Ausschluß der bakteriellen Zersetzungen andauernd verfolgte. Später wurde mit Erfolg zerriebenes Gewebe mit Chloroform oder Toluolzusatz zur postmortalen Verfolgung der Wirkungen von Plasma-Enzymen verwendet. Palladin sah in bestimmten Fällen einen Vorteil darin, die Pflanzen im ganzen gefrieren zu lassen, und dieselben unter Chloroformzusatz auftauen zu lassen. Diese Plasma-Enzyme werden als Endo-Enzyme oder intrazelluläre Enzyme zusammengefaßt.

So wie aber der tierische Organismus zur Aufarbeitung der aufgenommenen Nah-

Digitized by Google

rungsbestandteile in den Verdauungsorganen reichlich Enzyme nach außen hin absondert und auf diese Weise in die Lage kommt, die bereits enzymatisch aufgeschlossenen Nahrungsstoffe zu resorbieren, so braucht auch die Pflanze häufig zum Nahrungsumsatz größere Enzymmengen, welche nach außen hin von den Zellen abgesondert werden. Derartige pflanzliche Sekretions-Enzyme sind z. B. die eiweißspaltenden Enzyme der Drosera, Dionaea, der Kannen von Nepenthes. Auch Schimmelpilze geben sicher Stärke spaltendes und Rohrzucker invertierendes Enzym in die Kulturflüssigkeit durch Sekretionsvorgänge ab. Bekanntlich besitzen fast alle Pflanzen nährstoffreiche Ruhestadien, welche in den Samen der höheren Pflanzen ihre vollkommenste Ausbildung finden. Um nun bei der Samenkeimung die reichlich aufgestapelten Stoffe, wie Kohlehydrate, Fette, Eiweiß zu mobilisieren, findet eine enzymatische Umwandlung derselben in lösliche Materialien durch Hydrolyse statt, und die löslichen Umsatzprodukte werden nach dem Diffusionsgesetze sich dauernd nach den Orten des stärksten Verbrauches fortbewegen. Bei der Lösung der Stoffe in den Nährgeweben scheint sowohl Sekretion von Enzymen stattzufinden, wie sie für die Abgabe von Diastase durch das schildförmige Keimblättchen im Grassamen sichergestellt ist — als auch reichliche Enzymproduktion in den Nährgewebszellen selbst, die soweit geht, daß Enzym aus einer Zelle in die benachbarten hinüberdiffundiert.

Das biologische Gesetz, daß ein Mehrbedarf an Stoff und Energie die hierzu erforderlichen Mittel im Organismus quantitativ innerhalb gewisser Grenzen steigert, gilt auch von den Enzymen. Bei Schimmelpilzen ließ sich sicher feststellen, daß die Diastaseproduktion bei reichlicher Stärkedarreichung bedeutend wächst, und auf stärkefreiem Milieu viel geringer ist. Aehnliche Tatsachen haben auch auf verschiedenen anderen Gebieten erwiesen, daß die Enzymbildung regulatorischer quantitativer Aenderungen fähig ist.

So wie sich aus tierischen Organen mehrfach Stoffe gewinnen ließen, welche an sich keine enzymatischen Wirkungen besitzen, jedoch schon durch schwache chemische Einwirkung, wie durch verdünnte Säuren, in kräftig aktive Enzymlösungen übergehen, so gelang es auch mehrfach bei pflanzlichen Organen parallele Erfahrungen zu sammeln. Hier wie dort nennt man diese aktivierbaren Stoffe Zymogene oder Profermente.

3. Darstellung und stoffliche Eigenschaften der Enzyme. Seit dem Beginn der pflanzenchemischen Forschung bemüht man sich der reinen Pflanzen-Enzyme habhaft zu werden, hat jedoch bis heute auf diesem Gebiete noch keine befriedigenden Erfolge erzielen können. Sekretionsenzyme, wie Diastase, Invertin, gewinnt man durch Auslaugen des zerkleinerten Materials in wässeriger Lösung, und kann aus dieser Lösung durch Alkoholfällung und (nach nicht allzulangem Stehen unter Alkohol vorgenommenem) Wiederauflösen in Wasser wirksame Roh-Enzympräparate erhalten. Aussalzen mit Ammoniumsulfat ist der Alkoholfällung jedoch weit vorzuziehen, und man hat durch fraktionierte Salzfällung und Ausdialysieren sehr wirksame Präparate erhalten, die jedoch nie von Begleitkolloiden frei waren. Je mehr diese augenscheinlich als „Schutzkolloide" (siehe den Artikel „Disperse Gebilde") dienenden Stoffe entfernt werden, desto leichter veränderlich werden die Präparate. In einigen Fällen ist es aber in der Tat gelungen zu Enzympräparaten zu gelangen, welche ohne Beeinträchtigung ihrer Wirkung die gewöhnlichen Eiweißreaktionen nicht mehr zeigten. So wurde die frühere Meinung, daß alle Enzyme eiweißartiger Natur sein müßten, stark erschüttert, und es ist tatsächlich kein ernstes Bedenken gegen die Möglichkeit zu erheben, daß es Enzyme nicht proteinartiger Natur gibt, obgleich das Vorherrschen eiweißartiger Verbindungen im Protoplasma es nicht auffallend erscheinen lassen würde, wenn alle oder doch die meisten Enzyme zur Proteidklasse gehören würden. Die Inaktivierung durch Hitze, die man gewöhnlich dadurch erklärt, daß die Enzyme gerinnbare Eiweißkörper seien, erfolgt wohl immer bei höheren Temperaturen als jenen, bei denen die meisten Proteide koagulieren. Das gewichtigste Argument zugunsten der Eiweißnatur der Enzyme ist ihre Zugehörigkeit zu den Antigenen. In die Blutbahn von Tieren gebracht, erregen die Enzyme daselbst Produktion von Anti-Enzymen, welche spezifisch die Aktion der einverleibten Enzym-Art in vitro hemmen. Bisher kennt man aber nur Antigene eiweißartiger Natur. Zu bemerken ist jedoch, daß es bei der weitverbreiteten Katalase bisher nicht gelungen ist im Serum die Bildung einer Antikatalase zu bewirken.

4. Dynamik der Enzymwirkungen. Die Kinetik der Wirkungen der Pflanzen-Enzyme war so sehr das Studienobjekt der theoretischen Chemie, daß wir uns hier auf die Hervorhebung einiger wichtiger physiologischer Momente beschränken können. Zunächst einige Bemerkungen über diejenigen Faktoren, welche Enzymwirkungen fördern. In der lebenden Pflanzenzelle wird von dem fördernden Einflusse höherer Temperaturen, welcher in der experimentellen Enzymforschung eine so hervorragende Rolle spielt, relativ wenig Nutzen gezogen, da andauernd hohe Außentemperatur von 30 Grad und mehr in

Digitized by Google

der Regel nicht dargeboten wird, und die Pflanzen nicht die Einrichtungen besitzen, ihre Körpertemperatur entsprechend über die Temperatur der Umgebung erhöht zu halten, wie die warmblütigen Wirbeltiere. Die relativ niedere Temperatur, bei welcher sich die chemischen Vorgänge in der Pflanzenzelle abspielen, hat aber wieder den Vorteil, daß der Enzymzerfall, dessen Geschwindigkeit mit steigender Temperatur stark zunimmt, in unmerklich geringem Maße eintritt, und so sehr geringe Enzymmengen ausreichend sind. Die schädigenden Wirkungen von Temperaturen gegen 40 Grad dürften unter anderem wesentlich mit dem bedeutend gesteigerten Enzymzerfall zusammenhängen. Hingegen spielen im pflanzlichen Stoffwechsel die fördernden Einflüsse chemischer Art regelmäßig eine bedeutende Rolle. Der bekannte günstige Einfluß von Säuregegenwart bei Enzymreaktionen, welcher bei der peptischen Verdauung durch den salzsauren Magensaft so prägnant hervortritt, findet sein Seitenstück in der Säureproduktion durch die Verdauungsdrüsen der tierfangenden Pflanzen. Aber auch bei Diastase, Lipase und anderen pflanzlichen Enzymen dürfte regelmäßig ein fördernder Einfluß von Säure in der Zelle stattfinden. Bei den Oxydationsenzymen kennt man einen stark fördernden Einfluß von Mangansalzen. Beim Alkoholgärungs-Enzym der Hefe spielen Phosphorverbindungen eine ähnliche Rolle.

Hemmende Einflüsse chemischer Natur sind von den Enzymreaktionen innerhalb der Zelle noch nicht in dem gleichen Umfange bekannt, dürften jedoch nirgends fehlen. Besonders merkwürdig sind die als Anti-Enzyme bekannten hitzeunbeständigen und streng spezifisch wirksamen Hemmungsstoffe, deren Existenz man zuerst durch Injektion von Pflanzen-Enzymen in die Blutbahn von Tieren auffand. Anti-Enzyme sind jedoch auch im normalen Stoffwechsel regelmäßig vorhanden. Auf botanischem Gebiete kennt man wenigstens Anti-Oxydasen, welche bei verschiedenen Reizbewegungen in höheren Pflanzen in vermehrter Menge nachgewiesen werden konnten. Dadurch, daß diese Anti-Enzyme schon bei etwas niedererer Temperatur unwirksam werden als das von ihnen beeinflußte Enzym, kann man durch Erwärmen auf 62 Grad die Wirksamkeit in dem Enzym-Anti-Enzymgemisch wiederherstellen und so beweisen, daß das Anti-Enzym nicht etwa das Enzym vollständig vernichtet.

Dort, wo es der physiologische Zweck verlangt, intensive Enzymwirkungen zu entfalten, bringt der Organismus stets größere Enzymmengen hervor. Wirkung und Enzymmenge sind innerhalb bestimmter nicht zu enger Grenzen proportional. Darin unterscheiden sich die Enzymwirkungen, und die katalytischen Wirkungen überhaupt, durchgreifend von den Auslösungsvorgängen in der lebenden Zelle, bei denen eine proportionale Abhängigkeit der Wirkungsquantität von der Quantität des auslösenden Agens nicht beobachtet wird.

Von größtem biologischem Interesse ist die theoretische Forderung der modernen katalytischen Theorie der Enzyme, daß Enzyme als Katalysatoren die von ihnen beherrschten Reaktionen nicht nur in der Richtung der Spaltung, sondern auch nach der Richtung der Synthese beeinflussen müssen. Dieser Satz ist in der Tat bereits für manche Kohlehydrat-Enzyme (Maltase, Emulsin), ferner für Lipasen, Chlorophyllase und andere experimentell bestätigt worden. Leider ist jedoch der gehoffte Ausblick auf die vitalen Synthesen in der Zelle noch durch manche Unklarheiten getrübt. Manche Forscher wie Pantanelli, Euler und andere sind zu der Ansicht gelangt, daß die Synthesen durch besondere Enzyme beherrscht werden. Nach Pantanelli wirkt Invertin zwar auf die Spaltung des Rohrzuckers, jedoch nicht auf die Synthese desselben aus Fruktose und Glukose; die Synthese soll vielmehr durch ein spezielles Enzym, die Revertase, bedingt werden. Euler hat ein besonderes synthetisches Enzym aus Hefepressaft aufgestellt, die „Phosphatase", welche Kohlehydrat-Phosphorsäureester bildet. Es ist nicht unmöglich, daß für manche Enzyme der Pflanzenzelle tatsächlich die Bedingungen zur synthetischen Wirkung günstiger liegen, so daß ihre spaltende Wirksamkeit viel weniger leicht entfaltet wird. Dabei braucht man nicht zur Annahme Zuflucht zu nehmen, daß es ausschließlich synthetisch und ausschließlich spaltend wirksame Enzyme gibt, was mit der katalytischen Enzymtheorie im Widerspruch stehen würde. Wenn hinsichtlich der Stärkebildung durch Diastase aus Zucker und der Eiweißbildung durch Proteasen aus Aminosäuren noch die experimentellen Beweise fehlen, so kann dies an der komplexen Natur dieser bisher als einheitlich hingestellten Enzyme liegen. Hier handelt es sich kaum um so einfache Enzymreaktionen wie bei Lipase oder Emulsin.

5. Spezifische Wirksamkeit der Enzyme. Weniger tiefgehendes physiologisches Interesse bietet die Frage inwieweit ein einzelnes Enzym mehrere differente Wirkungen entfalten kann. Solange man die Enzyme aus Pflanzenorganen nicht rein präparativ abtrennen kann, wird sich diese Frage schwerlich exakt beantworten lassen. Doch wird im allgemeinen wohl die Anschauung Recht behalten, daß eine eingreifende Spezialisierung der Enzyme als all-

Digitized by Google

gemeine Erscheinung anzusehen sei, und nur ausnahmsweise ein Enzym mehrere Substanzen angreift. Da es sich in den verschiedenen Kohlehydraten, Eiweißkörpern, Glykosiden usw. gewöhnlich um optischaktive Modifikationen racemischer Verbindungen handelt, bei denen die sterische Struktur eine große Rolle spielt, so ist die Annahme berechtigt, daß die Enzyme diesen spaltbaren Stoffen sterisch angepaßt sein müssen (E. Fischer). Dadurch wird aber die Wahrscheinlichkeit, daß ein Enzym auf differente Stoffe einwirken kann, sehr gering. Ueberdies ist es mit der fortschreitenden Untersuchungstechnik in vielen Fällen gelungen, die einem bestimmten Präparate anhaftenden Enzymwirkungen partiell zu vernichten, ohne andere gleichzeitig vorhandene zu stören, was gleichfalls für eine Präexistenz mehrerer Enzyme verwertet werden kann.

6. Systematik der Enzyme. Wir nehmen zweckmäßig als Einteilungsprinzip die Wirkung auf Stoffe aus den einzelnen großen Gruppen organischer Verbindungen, wie Kohlehydrate, Fette, Eiweißstoffe, Glykoside usw., wobei sich ungezwungen die Bedeutung hydrolysierender Wirkungen, Abspaltung von Ammoniak, Kohlensäure, von Oxydations- und Reduktionswirkungen für die Charakterisierung der Enzymgruppe ergibt.

6a) Kohlehydrat-Enzyme. Die erste Gruppe derselben umfaßt Enzyme, welche auf Disaccharide einwirken. Rohrzucker spaltendes Enzym oder Invertin ist in Pflanzenzellen außerordentlich verbreitet, doch kennt man Bakterien und Pilze, welche Rohrzucker nicht angreifen und mithin kein Invertin enthalten können. Versuche, das Enzym rein darzustellen, sind besonders beim Hefe-Invertin oft unternommen worden, ohne daß jedoch endgültige Resultate erzielt worden wären. Man kennt Invertin sowohl als Endo-Enzym als auch als Sekretions-Enzym. — Maltase, die Malzzucker spaltenden Enzyme umfassend, gleichfalls von sehr weiter Verbreitung bei niederen und höheren Pflanzen. Sie ist weniger gut bekannt als das Invertin, da sie häufig als Endo-Enzym vorkommt und erst nach Zertrümmerung der Zellen in Lösung geht. Maltaselösungen sind auch weniger haltbar als Invertinlösungen. Sehr gewöhnlich begleitet Maltase die Stärke spaltende Diastase, da das Endprodukt der diastatischen Wirkung Malzzucker ist. — Trehalase, die Trehalose zu Traubenzucker spaltend, und Melibiase, die aus der Raffinose erhältliche Melibiose zu Traubenzucker und Galaktose spaltend, kommen nur bei Pilzen häufig vor. — Laktase, das Milchzucker spaltende Enzym, kennt man im Pflanzenreiche nur von Bakterien und wenigen Pilzen.

Als Polysaccharid-Enzyme seien alle anderen Kohlehydrat-Enzyme zusammengefaßt. Von ihnen kennt man jene, welche auf Trisaccharide: Raffinose, Melezitose, Gentianose, sowie jene, welche auf Tetrasaccharide wie Stachyose einwirken, nur unzureichend. Die größte physiologische Bedeutung kommt den Stärke spaltenden Enzymen, Diastase, Amylase, zu. Diastase hält sich in Trockenpräparaten und wässerigen Lösungen relativ sehr gut, offenbar wegen der reichlichen Gegenwart von schleimigen Kohlehydraten als Schutzkolloiden. Die Angaben über die Eigenschaften möglichst rein dargestellter Malzdiastase gehen weit auseinander. Die Meinung mancher Forscher (Wroblewski), daß es sich um einen albumoseartigen Eiweißkörper handle, ist nicht unbestritten geblieben. Diastase fehlt nur wenigen Bakterien und Pilzen, und ist, wie schon die ungeheure Verbreitung der Stärke bei höheren Pflanzen zeigt, in Pflanzenzellen eines der gewöhnlichsten Enzyme. Große Diastasemengen werden als Sekretionsenzym bei der Keimung von stärkehaltigen Samen, Knollen, Rhizomen gebildet. Nach verschiedenen Angaben ist die aus dem Keimling stammende Diastase (Sekretionsdiastase) von der im Endosperm entstehenden „Translokationsdiastase" verschieden. Aus verschiedenen Gründen ist es wahrscheinlich, daß wir es in der Malzdiastase mit keinem einheitlichen Enzym zu tun haben; es dürfte vielmehr einmal ein Enzym vorliegen, welches vorwiegend auf die hochkolloidalen Stärkekohlehydrate wirkt, und dieselben in wasserlösliche Produkte überführt (Dextrinase), sodann ein Enzym, welches aus diesen Dextrinen Zucker bildet. In unreifen Samen soll nach Fernbach und Wolff ein Enzym vorkommen, welches eine Lösung von löslicher Stärke ausflockt (Amylokoagulase). Die Spaltung des Glykogens in den Pilz- und Bakterienzellen geschieht wohl zweifellos durch ein von der Diastase differentes Enzym, die Glykogenase. — Von dem das Inulin spaltenden Enzym, der Inulase, welche nicht nur in den inulinführenden Organen höherer Pflanzen, sondern auch bei Pilzen vorkommt, kennt man kaum mehr als die Existenz und die Wirkung. — Ebenso von der Cytase, welche die Zellwände keimender Samen angreift und die darin abgelagerte „Reservezellulose" in Zucker überführt. Von der Cytase unterscheidet man die Enzyme, welche echte Zellulose hydrolysieren, als Cellulasen; man kennt sie insbesondere von Pilzen und Bakterien. Als Pectinasen hat man die Pectinstoffe angreifenden Enzyme zusammengefaßt. Eines von diesen Enzymen koaguliert wässerige Pectinlösungen. — Die auf Agargallerte wirksamen Bakterienenzyme hat man Gelase genannt.

Digitized by Google

6b) Fett-Enzyme. Die Aufspaltung der Fette im Organismus der Pflanze wird regelmäßig durch Enzyme besorgt, die man als Lipasen zusammenfaßt. Aus Fettsamen, z. B. Ricinus, läßt sich ein Rohpräparat von Lipase leicht darstellen, welches Fett in Glycerin und freie Fettsäuren spaltet, ein Prozeß, welcher bereits technische Bedeutung erlangt hat. Nach den bisherigen Erfahrungen sind Lipasen in Wasser unlösliche Enzyme, welche auch auf andere Fettsäure-Glyceride und Alkoholester spaltend einwirken. Ob die auf die Phosphatide, z. B. Lecithin, wirksamen Enzyme different sind (wie man aus der optischen Aktivität der Lecithine schließen könnte), muß noch näher untersucht werden. Pilze und Bakterien greifen Fette nicht selten durch Vermittlung ihrer fettspaltenden Enzyme energisch an.

6c) Glykosid-Enzyme. Die in manchen Pflanzenorganen massenhaft aufgestapelten Glykoside, wie Amygdalin der bitteren Mandeln, Myrosin der Senfsamen, Indikan der Indigoblätter, werden in der Regel von Enzymen begleitet, welche schon beim Zerreiben der Organe mit Wasser kräftige Wirksamkeit entfalten. Doch finden sich diese Enzyme häufig auch anderwärts, wo die betreffenden Glykoside nicht vorkommen. So findet sich das Emulsin, welches Liebig und Wöhler als das Blausäure abspaltende Prinzip der bitteren Mandeln erkannten, weit verbreitet im Pflanzenreiche und ist auch auf andere Glykoside und Zuckerderivate wirksam. Uebrigens ist nach den Feststellungen von Bourquelot und Armstrong das Mandel-Enzym ein Gemisch von 2 bis 3 Enzymen, welche verschiedene Wirkungssphären haben. Das Mandel-Enzym war für die Erkenntnis der stereochemischen Beziehungen zwischen Enzym und spaltbarer Substanz durch E. Fischer bedeutungsvoll. Amygdalin liefert nämlich nur mit Emulsin Blausäure neben Benzaldehyd und Traubenzucker, während es unter Einwirkung von Maltase Mandelsäurenitrilglykosid und Traubenzucker gibt. Emulsin und Maltase sind ferner dadurch verschieden, daß das erstere von den beiden stereoisomeren Glykose-Methylestern nur das β-Methylglykosid, die Maltase aber nur das α-Methylglykosid spaltet. Man erfährt demnach aus der Angreifbarkeit durch Emulsin und Maltase genaueres über die sterische Struktur natürlicher Glykoside. Armstrong nennt das eigentliche Mandelemulsin β-Glukase, und konnte die beiden Begleitenzyme Amygdalase und Glukolaktase durch geeignete Vorbehandlung davon in ihren Wirkungen sondern. Vom Emulsin sind die Enzyme, die auf die Glykoside Phloridzin, Populin, auf Salizylsäuremethylester-Glykosid, auf die Blausäure liefernden Linamarin und Lotusin wirksam sind, wahrscheinlich verschieden. Das auf das pflanzliche Indikan oder Indoxylglykosid einwirkende Enzym der Indigoferablätter wurde als Isatase bezeichnet. Das Alizaringlykosid der Krappwurzel wird durch das Erythrozym spezifisch gespalten. Das Myrosin, verbreitet bei den Cruciferen, Reseda, Tropaeolum, wirkt auf die glykosidischen Senföl bildenden Stoffe: Sinigrin, Glukonasturtiin, Sinalbin u. a. m. ein. Auch eine auf glykosidische Gerbstoffe wirkende Tannase wurde beschrieben.

Das Chlorophyll hat nach Willstätter eine esterartige Struktur, indem es in einen Fettalkohol (Phytol) und das chromophore Chlorophyllid spaltbar ist. Diese Spaltung führt auch ein von Willstätter in den Chlorophyllkörnern allgemein nachgewiesenes Enzym, die Chlorophyllase durch, welche dadurch ausgezeichnet ist, daß sie erst durch hohe Alkoholkonzentrationen gehemmt wird. — Das in Pflanzenorganen sehr verbreitete Phytin oder Inosit-Phosphorsäureester wird durch das Enzym Phytase gespalten.

6d) Eiweiß-Enzyme. Der primäre Abbau der Eiweißkörper vollzieht sich unter dem Einflusse von Säuren oder Enzymen in wässeriger Lösung ebenso wie die Spaltung der Kohlehydrate unter Wasseraufnahme, Hydratation; doch liegt hier die Besonderheit vor, daß eine ganz bestimmte Bindung, die Karbonyl-Imidbindung $-CO-NH-\overset{|}{\underset{|}{C}}-$ getrennt wird, wobei freie Aminosäuren mit den Gruppen $-COOH$, $H_2N-\overset{|}{\underset{|}{C}}-$ entstehen. Auf die Gruppe $-CONH_2$ der Säureamide wirken die Eiweiß-Enzyme hingegen nicht ein. Mit Ausnahme der Bakterien, mancher Pilze, sowie der tierfangenden höheren Pflanzen bilden die Gewächse nicht so reichlich proteolytische Sekretionsenzyme wie die Tiere, sondern meist nur Endoproteasen. Man hat deswegen die proteolytischen Enzyme im Pflanzenreiche zum Teil lange Zeit übersehen, und dieselben erst durch die Methode der Autolyse besser kennen gelernt. Die Zuteilung der Eiweiß-Enzyme der Pflanzen zu den drei Gruppen, die wir aus dem Tierreiche kennen, nämlich den Pepsinen, welche nur echte Eiweißstoffe angreifen, und auf komplexe Aminosäuren oder Polypeptide wirkungslos sind, ferner den Trypsinen, welche auch Polypeptide energisch spalten, endlich den Erepsinen oder Peptasen, welche echte Eiweißkörper nicht angreifen, wohl aber die Polypeptide spalten, ist vielfach noch zweifelhaft. Für das Nepentheskannen-Enzym hat Abderhalden

Digitized by Google

die Zugehörigkeit zu den Pepsinen behauptet, von manchen Bakterienenzymen steht wohl die Zugehörigkeit zu den Trypsinen fest, und auch echte Erepsine hat man verschiedenfach kennen gelernt. Es scheint aber nach Vines doch, daß in vielen Fällen durch ein gleichzeitiges Vorkommen von peptischen und ereptischen Enzymen die Existenz von Trypsinen vorgetäuscht werden kann. Die Parallele mit der Dualität der diastatischen Enzyme wäre nicht außer acht zu lassen. Auch bei dem vielstudierten Enzym des Milchsaftes des Melonenbaumes, Carica Papaya, dem Papain, oder Papayotin ist die Einheitlichkeit noch fraglich, da bei längerer Einwirkungsdauer das Papains relativ viel Albumosen und Peptone vorhanden sind. Bekanntere pflanzliche Eiweiß-Enzyme sind sodann das Bromelin aus der Ananasfrucht, die Enzyme aus Ficusmilchsaft und aus Cucurbitaceenfrüchten. Die proteolytischen Enzyme der Pflanzen scheinen zum allergrößten Teile am besten in saurer Lösung zu wirken, im Gegensatze zum tierischen Pankreas-Trypsin, eine Differenz, welche jedoch nur ein sekundäres Moment darstellt. — Enzyme, welche dem Labferment des Magens oder dem Chymosin analog wirken, kennt man schon lange in großer Zahl aus dem Pflanzenreiche. Solche milchkoagulierende Enzyme finden sich unter anderem in der Artischoke („Cynarase"), im Milchsafte des Feigenbaumes, in den Samen der indischen Solanacee Withania coagulans, in Pinguicula, Galium und verschiedenen anderen. Auch Pilze und Bakterien laben oft Milch. Die Bedeutung dieser Enzyme ist noch völlig unklar. Zu bemerken ist, daß selbst die Magenchymosine keine selbständigen Enzyme darstellen, sondern daß wir es in der Labwirkung mit einer speziellen Wirkung des Pepsins zu tun haben.

Die Stellung der auf Nukleoproteide wirksamen Enzyme, der Nukleasen, die man auch aus dem Pflanzenreiche kennt, ist noch näher festzustellen.

6e) Ammoniak abspaltende Enzyme oder Amidasen. Abgesehen von der bakteriellen Eiweißfäulnis, wo die Ammoniakbildung auf solche Enzyme zurückzuführen ist, sind fermentative Ammoniakabspaltungen auch von höheren Pilzen und Phanerogamen bekannt geworden. Die Urease der Harnstoff vergärenden Bakterien ist mit in diese Enzymgruppe zu stellen.

6f) Kohlensäure abspaltende Enzyme, Karboxylasen. Die Entstehung der Phenole bei Eiweißfäulnis ist ein Prozeß, der auf der Einwirkung derartiger Enzyme auf aromatische Aminosäuren beruht. Aber auch die Atmungsvorgänge der höheren Pflanzen haben Anhaltspunkte für die Existenz von CO_2-abspaltenden Enzymen geliefert. Hefe bildet nach Neuberg aus Brenztraubensäure und Oxymaleinsäure reichlich CO_2. Ein CO_2-bildendes Enzym scheint bei der Veratmung des Zuckers im Blütenkolben von Araceen vorzukommen (Hahn). Die Mitwirkung solcher Enzyme bei der CO_2-Produktion in der Atmung ist zuletzt besonders von Palladin erwogen worden. Hier hätte man auch wohl das Enzym der Alkoholgärung, oder die Zymase einzuschalten, welche bei Hefe, Schimmelpilzen und höheren Pflanzen in gleicher Weise festgestellt ist, und Zucker in CO_2 und Alkohol spaltet.

6g) Oxydierende Enzyme oder Oxydasen. Da dieselben mit der Sauerstoffatmung der Pflanzen in enger Beziehung stehen, so finden sich die näheren Angaben hierüber in dem Artikel „Atmung der Pflanzen", auf welchen somit verwiesen sei.

6h) Reduzierende und Wasserstoff anlagernde Enzyme. Da man bereits eine Anzahl von inorganischen Reduktionskatalysen kennt, so hat die Annahme, daß die vitalen Reduktionsprozesse gleichfalls katalysiert werden können, vieles für sich. In der Tat ist für die Reduktion sauerstoffhaltiger Farbstoffe bei Bakterien die Mitwirkung solcher Enzyme behauptet worden. Dort, wo es sich wie beim Methylenblau um sauerstofffreie Verbindungen handelt, wird man besser von Hydrogenasen als von Reduktasen sprechen, da es sich nur um Anlagerung von Wasserstoff bei der Bildung der Leukoprodukte handeln kann.

6i) Milchsäuregärungs-Enzym. Es würde sich endlich das Enzym der Milchsäuregärung des Zuckers als eine besondere Enzymgruppe anschließen, indem es sich hier um eine glatte Spaltung von 1 Aequivalent Traubenzucker in 2 Aequivalente Milchsäure handelt, ein Prozeß, welcher in keiner der angeführten Enzymwirkungen ein Analogon findet.

Literatur. *J. R. Green, Die Enzyme. Deutsch von Windisch. Berlin 1901. — F. Czapek, Biochemie der Pflanzen. 2 Bde. Jena 1905. — C. Oppenheimer, Die Fermente und ihre Wirkungen. 3. Aufl. 2 Bde. Leipzig 1910. — H. Euler, Allgemeine Chemie der Enzyme. Wiesbaden 1910.*

F. Czapek.

Eozoon

ein Gemenge von Marmor und Serpentin (Ophicalcit), das man zuerst in der kanadischen Gneisformation gefunden hat und für die Versteinerung eines der ersten Lebewesen hielt. Heute gilt seine unorganische Natur für erwiesen.

Digitized by Google

Epiphyten.

1. Begriff. 2. Vorkommen von Epiphyten. 3. Xerophiler Bau der Epiphyten. 4. Biologische Bedeutung des Epiphytismus. 5. Betrachtung der einzelnen Charaktertypen an ausgewählten Beispielen: a) Epiphylle Algen, Flechten und Moose. b) Epiphytische Lebermoose. c) Epiphytische Orchideen und Succulenten. d) Nestepiphyten. e) Bromeliaceen-Epiphyten. 6. Hemiepiphyten. 7. Beschaffenheit der Samen und Früchte von Epiphyten.

1. Begriff der Epiphyten. Epiphyten sind Gewächse, die ihren Wohnsitz auf anderen Pflanzen aufgeschlagen haben, deren Blätter, Zweige, Aeste, Stämme ihnen Raum zur Festheftung gewähren, ohne anders als durch den Entzug des Lichtes geschädigt zu werden, welches den als Substrat dienenden Pflanzen sonst zuströmen würde.

2. Vorkommen von Epiphyten. Betrachtet man die mitteleuropäischen Bäume im Walde, so finden sich auf ihren Stämmen mehr oder minder regelmäßig winzige grüne Algen, Flechten verschiedener Arten und einige kleinere Moose vor, die imstande sind, an solchem Standorte ihr Leben zu fristen. Sie leben hier auf Kosten der mit dem Regen oder Tau ihnen zufließenden Feuchtigkeit und der spärlichen sich im Regenwasser lösenden Staubteilchen, die sich auf der Rinde vorfinden, gleichviel welcher Herkunft sie seien. Erhalten können sie sich auf solchem Substrate nur vermittels einer sehr weitgehenden Unempfindlichkeit gegen Austrocknen, das zwar ihre Lebenstätigkeit zeitweilig sistiert, ohne jedoch ihr Absterben zu bedingen. Naturgemäß werden also diese Pflänzchen dort am besten gedeihen, wo eine solche Unterbrechung ihrer Lebensarbeit am wenigsten häufig eintritt, wo eventuell die Feuchtigkeit andauernd ihren Ansprüchen genügt.

Höher organisierte Pflanzen kennen nun eine derartige Unempfindlichkeit gegen zeitweiliges Austrocknen nicht, sie gehen daran rettungslos zugrunde. Wenn sie demnach trotzdem eine epiphytische Lebensweise zeigen, so müssen sie gegen die Möglichkeit eines auch nur einmaligen Austrocknens geschützt sein.

Daraus erklärt es sich, daß nur in Gegenden höchster und andauernder Feuchtigkeit höher organisierte Pflanzen zur epiphytischen Lebensweise übergehen können, und daß sie auch dort noch besonderer Schutzmittel bedürfen, besonders, wenn es sich um Pflanzen von größerem Umfange handelt.

Hinreichende und andauernde Feuchtigkeit gibt es lediglich in den tropischen Regenwäldern, denen sich höchstens noch die chilenischen und neuseeländischen Waldungen außerhalb der Tropen anreihen lassen. Nur hier also sind die hinreichenden und notwendigen Bedingungen für ein üppiges Epiphytenleben realisiert, und wo sich sonst lokales Epiphytenwachstum findet, ist es in seiner Herkunft stets auf diese Ausgangspunkte zurückzuführen.

Auch die Gebirge temperierter Länder sind ja vielfach durch reichlichere Niederschläge gegenüber den Tiefländern ausgezeichnet und der reichere Moos- und Flechtenbehang zeugt für diese größere Feuchtigkeit, doch setzt hier die winterliche Kälte, welche die Wasserversorgung hindert, eine Grenze, die zwar von den gegen eine Unterbrechung ihres vegetativen Lebens unempfindlichen niederen Pflanzen ohne Schaden überwunden wird, andere Gewächse aber ausschließt.

Ist somit das Auftreten von Epiphytenpflanzen aus den Kreisen der Farne und Blütenpflanzen durch klimatische Faktoren in ziemlich enge geographische Grenzen gebannt, so entfalten sie in dieser ihrer Heimat ein sehr mannigfaltiges und reiches Leben, das ein besonderes Interesse dadurch gewinnt, daß unendlich verschiedene Mittel den Pflanzen zu Gebote stehen, ihre Lebensbedingungen selbsttätig günstiger zu gestalten.

3. Xerophiler Bau der Epiphyten. Ward im vorhergehenden Abschnitt zu zeigen versucht, daß nur in den an Niederschlägen reichsten Teilen der Erde ein üppiges Epiphytenleben möglich ist, so gibt es doch nirgends auf der Erdoberfläche die Möglichkeit, kürzere Perioden stärkerer Verdunstung, die durch lebhafte Winde, durch intensive Besonnung oder durch Luftverdünnung im höheren Gebirge bedingt sein können, vollkommen auszuschließen. Ja, dieser Wechsel ist in der eigentlichen Heimat epiphytischer Blütenpflanzen, die im tropischen Regenwald die höchsten Baumkronen zieren, ein fast alltäglicher. Und so sind die Epiphyten gezwungen, sich mit ausgiebigem Schutz gegen Verdunstung zu versehen, sie gehören, obgleich sie nur im feuchtesten Klima lebensfähig sind, zu den ausgeprägten Xerophyten hinsichtlich ihrer biologischen Ausrüstung.

Xerophiler Bau äußert sich zunächst stets in einer Reduktion der transpirierenden Oberfläche. Kleinblättrigkeit oder Fehlen der Blätter müßte also ein häufiges Kennzeichen auch der Epiphyten sein. In der Tat haben die epiphyten Lycopodiumarten nur sehr kleine (vgl. Fig. 22), die Vertreter der Gattung Psilotum sogar auf ganz minimale Schüppchen reduzierte Blätter; der grüne Stamm selbst dient als Assimilationsorgan. Stark verdickte Cuticula der Epidermiswandung, lederige Struktur der kleinen, aufrechten Blätter, umgerollter Blattrand sind weitere Merkmale der Xerophilie, die sich bei den epiphytischen Ver-

Digitized by Google

tretern der Gattungen Vaccinium, Rhododendron, Aeschinanthus usw. finden. Endlich ist Sukkulenz der Blätter oder des Stammes als xerophiles Merkmal zu beachten; man findet sukkulente Blätter bei zahlreichen epiphytischen Orchideen, Peperomiaarten, bei Dischidia- und Conchophyllum (Fig. 8), während Hydnophytum und Myrmecodia als Beispiele sukkulenter Stämme genannt seien. Ein nur in selteneren Fällen bei Epiphyten zu beobachtendes Merkmal xerophilen Baues ist dichte Behaarung, wie sie bei Hochgebirgspflanzen aufzutreten pflegt. Hier sind jedoch die Tillandsien Amerikas zu erwähnen (Fig. 18 bis 20), deren Haarkleid freilich aus Schuppenhaaren gebildet ist, die eine weiterhin zu schildernde besondere Bedeutung besitzen.

Somit sind alle die verschiedenen charakteristischen Merkmale der Xerophilie auch an den Epiphyten in mehr oder minder hohem Grade nachzuweisen und es ergibt sich der scheinbare Widerspruch, daß im feuchtesten Walde lebende Pflanzen vermöge ihrer epiphytischen Lebensweise gezwungen sind, streng xerophilen Bau anzunehmen.

4. Biologische Bedeutung des Epiphytismus. Welcher Vorteil mag nun den Epiphyten, die in ihrer Struktur offenbar vielfache Opfer an Assimilationsflächen, Aufwand für Baumaterial ihrer dicken Wände usw. bringen, ihren nicht epiphytischen Verwandten gegenüber, aus ihrer Lebensweise erwachsen? Das erkennt man erst beim Vergleich eines tropischen Regenwaldes mit unseren einheimischen Wäldern. Der wesentliche Unterschied ist die vollständige Raumausnutzung; wo überhaupt noch Licht eindringt, sind spezifisch für diese Lichtintensität angepaßte Pflanzen angesiedelt. Es ist der Kampf um das Lichtoptimum, der in den epiphytischen Gewächsen seine mannigfaltigste und zugleich vollkommenste Lösung gefunden hat. Bei der sehr ungleichen Kronenhöhe der mannigfachen im tropischen Wald in regellosem Durcheinander vertretenen Bäume fällt überall viel Licht bis in die Tiefe. Glanzlichter, von den Blattflächen bei ihrer mehr oder weniger geneigten Lage in den Wald hinein reflektiert, erhellen viele sonst dunkel bleibende Schatten. Alle diese verschiedenen Lichtintensitäten werden durch Epiphyten, die sich auf den Baumstämmen, Aesten, Zweigen und Blättern angesiedelt haben, ausgenutzt und dadurch wird die jedem Beobachter auffallende Füllung eines tropischen Regenwaldes unserem heimischen gegenüber bedingt.

An diesem Kampfe um das spezifische Lichtoptimum sind nun nicht nur die bisher allein betrachteten typischen Vertreter der Epiphyten beteiligt, die ihr ganzes Leben hindurch auf die am Standorte vorhandenen Ernährungsbedingungen angewiesen bleiben, sondern es gibt auch zahlreiche, ja zum Teil die mächtigsten Vertreter dieser biologischen Klasse, welche den Epiphytismus nur als eine frühere oder spätere Etappe ihres Lebens, als eine Durchgangs- oder Endstation aufweisen; man könnte sie als Hemiepiphyten jenen echten Vertretern gegenüberstellen. Um nur kurz auf diese nachher ausführlicher zu behandelnden Formen hinzuweisen, sind zahlreiche Ficusarten Hemiepiphyten, die ihr Leben als Epiphyten beginnen und als mächtige Waldbäume beschließen, andererseits sind die wurzelkletternden Araceen Pflanzen, die ihr Leben am Boden anfangen, hoch in die Baumkronen emporsteigen und nach Absterben ihrer Achse die Verbindung mit dem Boden durch Tauwurzeln aufrecht erhalten.

5. Betrachtung der einzelnen Charaktertypen an ausgewählten Beispielen. 5a) Epiphylle Algen, Flechten und Moose. Sie stellen die einfachsten der spezifisch an feucht-tropisches Klima gebundenen Epiphyten dar. Die Gattungen Phycopeltis und Cephaleuros, Chroolepus und einzelne Arten von Trentepohlia haben ihren Wohnsitz auf den mehrjährigen Lederblättern fast sämtlicher Tropenbäume und Sträucher, ja, auch auf denen der großen Monocotylenstauden aufgeschlagen, so daß diese ein ganz eigenartiges Aussehen gewinnen. Mehr oder minder rundliche Flecken von gelber bis rotbrauner Farbe, die dem in den Zellen enthaltenen Hämatochrom entspricht, kennzeichnen diese Algen, deren stattlichere Vertreter aus der Gattung Cephaleuros sich mit einem Haarwald bedecken, der das täglich fallende Regenwasser etwas länger festzuhalten vermag. Zoosporen verbreiten, mit den Regentropfen herabfallend, die Algen von Blatt zu Blatt, wo sie in überraschend kurzer Zeit zu einer Haftscheibe auswachsen. Durch Luftströmungen herumgetragene Sporangien, die in diesem Haarwald entstehen, sorgen bei etwa länger anhaltender Trockenheit für Ausbreitung und ihre beim ersten Regenguß austretenden Zoosporen bilden eine ernste Gefahr für tropische Kulturgewächse, da einige Vertreter sich parasitischen Neigungen hingegeben haben.

Das Leben außerhalb des Wassers birgt aber für die meist an Wasser gebundenen Algen, die auch hier zahlreiche, auf größeren Wasserpflanzen wohnende Epiphyten wie Coleochaete, Melobesia, Chamaethamnion u. a. aufweisen, besondere Gefahren.

Ein großer Teil der Cephaleurosräschen wird alsbald von Pilzen befallen, die mit ihnen in symbiotische Beziehung treten und Flech-

Digitized by Google

ten von weißlicher Färbung mit schwarzen Perithecien bilden, die der Gattung Strigula u. a. aus der Verwandtschaft der Verrucariaceen angehören.

Endlich finden sich an schattigen und fehr feuchten Stellen auch kleine Lebermoose als epiphylle Gewächse; am häufigsten kommt Lejeunia Metzgeriopsis vor, deren flacher einschichtiger Thallus sich ebenso wie die Algen der Oberfläche anschmiegt und nur seine Sexualorgane mit abstehenden Blättchen umhüllt (Fig. 1).

Den eigenartigen Anblick eines derartig reich mit Algen, Flechten und Moosen bewachsenen Blattes gibt Figur 2.

5b) Epiphytische Lebermoose. Epiphytische Lebermoose treten vor allem

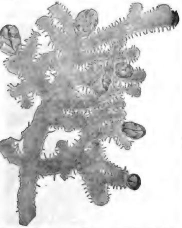


Fig. 1. Lejeunia Metzgeriopsis Goebel, männliche Pflanze. Vergrößert. Nach Goebel.

auf den Gipfeln und Abhängen der niedrigeren Berge im Monsungebiet hervor, die noch nicht unter dem austrocknenden Einfluß starker Luftverdünnung stehen. Hier trifft man Moosdecken, deren Dicke den Durchmesser der Tragäste weit überragt, und die sich bei Regen wie Schwämme mit Wasser vollsaugen, das sie lange Zeit festhalten, so daß in diesen regenreichen Zonen fast immer überall das Wasser niedertropft, auch wenn kein Regen herrscht. Je reicher die Zerteilung der Moosblättchen ist, um so größer ist ihre Wasserkapazität, und besonders steigert sich diese Fähigkeit durch die Ausbildung der Auriculae, öhrchenförmiger Auswüchse des Unterlappens der Blätter (eventuell auch der Amphigastrien), welche von Göbel als wasserhaltende Organe erkannt und als „Wassersäcke" bezeichnet wurden (Fig. 3). Noch weit komplizierter werden diese Bildungen bei anderen Gattungen wie bei Colura und Physiotium. Bei diesem ist eine auf der

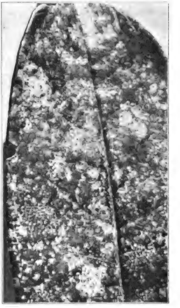


Fig. 2. Blattoberseite mit epiphyllen Algen, Flechten und Moosen.

Blattfläche entspringende Lamelle bei der Wassersackbildung beteiligt und die Figuren 4 a und b zeigen, daß es sich dabei um sehr ansehnliche und für das Aussehen des Mooses höchst charakteristische Organe handelt. Bei ihrer Größe ist die Ausgiebigkeit des Wasseraufsammelns, das den epiphytischen Pflänzchen an den von ihnen bewohnten Orten auch bei zeitweiliger stärkerer Verdunstung andauernde Vegetationsfähigkeit bewahrt, nicht gering zu veranschlagen.

Für den Reichtum an Feuchtigkeit solch epiphytischer Moospolster mag auch noch Figur 5 zeugen, die eine Kolonie einer kleinen Utricularia (orbiculata?) in einem solchen angesiedelt zeigt, Pflanzen, die sonst nur im Wasser oder in sehr feuchtem Boden sich erhalten können.

Damit ist zugleich eine erste höher organisierte Blütenpflanze als Epiphyt dargestellt, von der es nur fraglich bleiben muß, ob sie ohne das schützende Moospolster sich

Digitized by Google

würde erhalten können, da der ganze Aufbau ein sehr zarter, keineswegs xerophiler ist.

5c) Epiphytische Orchideen und Succulenten. Das ist bei der nächsten zu betrachtenden Pflanze ganz anders, zu der uns ein weiter Sprung hinüberführt. Taeniophyllum Zollingeri ist eine kleine, auf der kahlen Baumrinde im Buitenzorger Garten

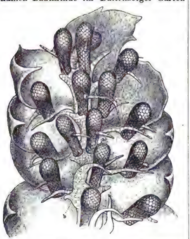


Fig. 3. Polyotus clavigea. Habitusbild. Vergrößert. Sowohl an den Amphigastrien, als an den Seitenblättern entspringen Wassersäcke, an den Amphigastrien 1—2, an den Seitenblättern je eins. Nach Goebel.

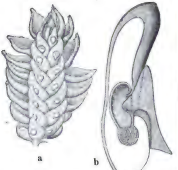


Fig. 4. Physiotium giganteum. a Stämmchen von unten; an den Wassersäcken schimmern die Vertiefungen durch, in welchen die Eingangsöffnungen liegen. b Halbierter Wassersack. Vergrößert. Nach Goebel.

und im ganzen Archipel nicht seltene Orchidee, die häufig in der stärksten Sonnenglut wächst. Figur 6 führt uns die Pflanze in natürlicher Größe vor. Man erkennt eine Anzahl von langen flachen Wurzeln als Hauptteil, deren grüne Farbe sie als Assimilationsorgane kennzeichnet. Sie liegen dem Substrat fest auf und sind mit winzigen Wurzelhaaren darauf befestigt. Ein Sproß ist kaum kenntlich, die Blätter sind zu unscheinbaren braunen Schüppchen reduziert. Nur bei der Blüten- und Fruchtbildung werden kurze Achsenteile hervorgebracht. Dagegen entstehen fortdauernd neue Wurzeln am Vegetationspunkte in akropetaler Reihenfolge, die funktionell die Blätter vollständig ersetzen. Der anatomische Bau der Wurzel

Fig. 5. Epiphytische Utricularia im Moospolster. Amboina. Gipfel des Salbutu.

ist dorsiventral, wie derjenige eines Blattes; die Oberseite führt unter der mit stark verdickter Wandung und dicker Cuticularschicht ausgerüsteten Epidermis chlorophyllhaltiges Gewebe. Die Unterseite zeigt eine mehrschichtige Wurzelhülle, deren entsprechende Wandungen weit geringere Mächtigkeit aufweisen. Es ist hier also die Reduktion der transpirierenden und Wasser verbrauchenden Blätter soweit wie überhaupt möglich durchgeführt; die Assimilation ist den Wurzeln übertragen, deren eine verhältnismäßig große Menge andauernd entwickelt wird. Um jedoch den Bau völlig zu verstehen, muß gesagt werden, daß die Wurzeln der unter den Epiphyten an Zahl

Digitized by Google

so hervortretenden Orchideen denen anderer Pflanzen gegenüber durchweg modifiziert sind. An Stelle der sonst einschichtigen Epidermis ist ein Velamen, d. h. eine aus inhaltsleeren, mit spiralfaserig verdickten Wänden versehenen Zellen gebildete Wurzelhülle getreten, die die Aufgabe hat, Wasser schnell und ausgiebig aufzusaugen und festzuhalten. In der darunter liegenden äußersten Rindenschicht, der Exodermis, sind verdünnte Zellwände an den sogenannten Durchlaßzellen die Einführungswege des aufgenommenen Wassers in die Wurzel. Bei dem Leben epiphyter Pflanzen ist dieser Bau durchaus verständlich. Taeniophyllum weicht nun als extreme Form soweit ab,

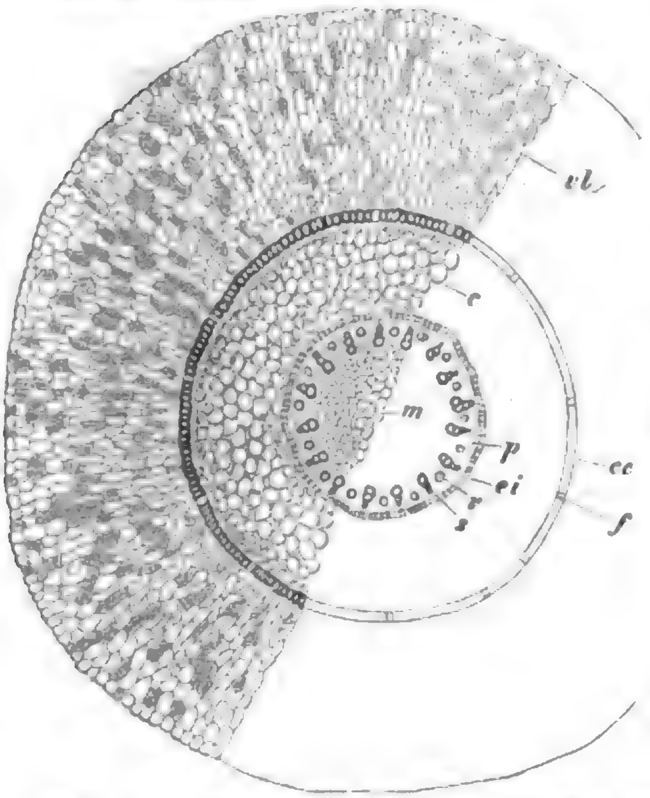


Fig. 7. Querschnitt durch die Wurzel von Dendrobium nobile. vl Velamen; ee Exodermis; f Durchgangszellen derselben; c Rinde; ei Endodermis; p Pericykel; s Gefäßteile; v Siebteile; m Mark. Vergrößerung 28. Nach Strasburger.

daß auf seiner Wurzeloberseite das Velamen fehlt, nur die stark verdickte Exodermis bildet den Schutz, so daß die chlorophyllhaltigen Zellen das volle Licht erhalten. Auf der Unterseite dagegen sind 2 bis 3 Lagen des Velamens erhalten, denen die Aufnahme von Wasser und der nötigen Nahrungsstoffe obliegt.

Die Taeniophyllumwurzeln sind, ohne eigentlich sukkulent zu sein, doch von fleischiger Beschaffenheit. Andere stattlichere Orchideen tragen in ihren verdickten fleischigen Anschwellungen des Stammes oder der

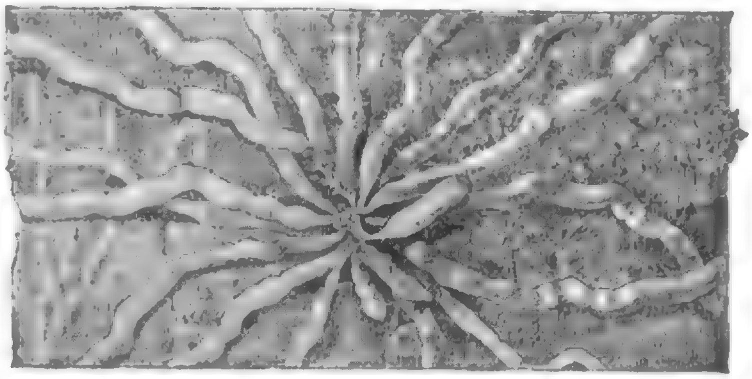


Fig. 6. Taeniophyllum Zollingeri Rchb. f. Natürliche Größe. Nach Wiesner. Aus Schimper.

Blattbasen — den sogenannten Luftknollen — Wasserbehälter, die ihnen über trockenere Zeiten hinwegzuhelfen vermögen; bei der in Fig. 7a wiedergegebenen Jonopsis sind diese von nur sehr bescheidener Größe. Dagegen sind die folgenden Pflanzen typische Sukkulenten. Hierher gehören die verschiedenen Peperomiaarten, die vielfach als Epiphyten auftreten, außerdem einige Asclepiadaceen aus der Gattung Dischidia, die an langen stielrunden Achsen dekussiert stehende, dick-

Fig. 7a. Jonopsis spec. Epiphytische Orchidee mit sukkulenten Blättern und fleischigen Luftknollen. Nach Schimper.

Digitized by Google

fleischige Blätter von teils abgeflachtem, teils kreisrundem Querschnitt hervorbringen. Besonders bekannt ist Dischidia Rafflesiana, die einen Teil ihrer Blätter durch sackförmige Vertiefung der Unterseite zu Wasserbehältern mit enger Oeffnung ausbildet, in welche dann eine sich stark verzweigende Adventivwurzel hineinwächst. Zu derselben Familie gehört die Gattung Conchophyllum, deren sukkulente Blätter mit ausgehöhlter Blattunterseite den Stämmen flach anliegen. So wird bei Conchophyllum imbricatum jedes Paar Blätter voll entwickelt, bei dem hier in Figur 8

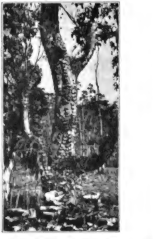


Fig. 8. Conchophyllum maximum auf Schattenbäumen einer Kaffeeplantage in Menado.

abgebildeten Conchophyllum maximum dagegen wird stets nur ein Blatt jedes Paares ausgebildet, das riesige Größe erreicht und sich quer über den ganzen Stamm legt, die Basis abwärts gekehrt. So sind Stamm und Haftwurzeln unter dem Schutze des schildkrötartigen sukkulenten Blattes geborgen, das an den geschützten Hohlraum sehr wenig Transpirationswasser abgeben wird, während das bei Regengüssen am Stamm herablaufende Wasser zum Teil unter die Blattränder gesogen und hier festgehalten werden kann. Auf diese Weise vermag die Pflanze in Menado, wo sie heimisch ist, im stärksten Sonnenbrande gut fortzukommen und sich massenhaft zu verbreiten.

Ganz ähnliche Existenzbedingungen sind für den interessanten Farn Polypodium imbricatum zu erwähnen, das auf den Bergen Amboinas lebt (Fig. 9). Nur ist es hier der gegliederte ausgehöhlte breite Stamm, der die Funktion, einen Hohlraum für den

Fig. 9. Polypodium imbricatum.

Wurzelschutz zu bilden, ausübt und an seinen Rändern rings das Regenwasser unter den Rand in den Hohlraum eintreten läßt, während auf dem breiten Rücken des dickfleischigen Stammes die großen Fiederblätter stehen.

Hier wären auch die vielgenannten stammsukkulenten Myrmecodia und Hydnophytum zu erwähnen, die mit inneren Transpirationshohlräumen versehen sind. Nachdem ihr Bewohntsein von Ameisenkolonien als eine für ihr Leben nicht notwendige Zufälligkeit nachgewiesen war, ist die Bedeutung des labyrinthischen Hohlraumsystems als Transpirationsraum mit möglichster Wasserersparnis und als für Wasseraufnahme in die Höhlung bei starken Regengüssen geeignetes Organ erkannt worden.

5d) Nestepiphyten. Einen besonderen Typus von Epiphyten bilden diejenigen Formen, die auf irgendeine Weise sich auf ihrem Standorte einen künstlichen Boden

Digitized by Google

bereiten, der durch die Menge fallenden Laubes usw. stetig eine Fülle von humusbildenden Stoffen zugeführt erhält und Gewächse von bedeutenden Ansprüchen an Nahrungsmaterial zu erhalten imstande ist. Als einfachste Ausgangsform derartiger Epiphyten, die als „Nestepiphyten" bezeichnet sein mögen, ist das mächtige Asplenium Nidus anzusehen. Figur 10 führt

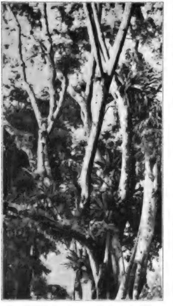


Fig. 10. Asplenium Nidus.

einen Ficusstamm des Buitenzorger Gartens vor, dessen Zweige eine Menge dieser großen Farnpflanzen beherbergen; die Wedel sind äußerst kräftig gebaut und stehen rings in geschlossenem Kreise. Naturgemäß sammelt sich in diesen umfangreichen Trichtern eine Masse von abfallendem Laub, Aesten usw. an, die stetig vom Regenwasser feucht gehalten, einem schnellen Zersetzungsprozeß unterliegt und der durch die Astwinkel und eigene Wurzelbildung festhaftenden Epiphytenpflanze hinreichende Nährstoffe für eine stets mächtiger werdende Entwickelung liefert. In den künstlichen Boden hinein werden alsdann die Nährwurzeln der Pflanze ausschließlich entsandt.

Während nun bei diesen großen Nestfarnen, deren Dimensionen, wie Junghuhn schildert, dem Tiger ein Versteck gewähren, von wo aus er seine Opfer unversehens überfallen kann, die grünen Assimilationswedel selbst das Nest bilden, in dem der Humus sich ansammelt, besitzen andere Farne dimorphe Wedel, deren eine, sehr festgebaute, als Nischenblätter bezeichnete Form ihren Chlorophyllgehalt bald verliert und als aufragende Nische dem am Stamm herabgeschwemmten Humus Halt gewährt, so daß sich zwischen dem Stamm des Stützbaumes und dem Nischenblatt ein künstlicher Boden ansammelt, der von der Pflanze ausgenutzt werden kann. Die zweite Wedelform, der sowohl die Assimilationsarbeit wie auch die Sporangienbildung zufällt, wird dann vielfach in hängender Weise angeordnet sein, wie bei zahlreichen Platyceriumarten, von denen Figur 11 in Platycerium grande

Fig. 11. Platycerium grande.

ein anschauliches Beispiel vorführt. Uebergänge vom Typus des Nestfarnes zu dem des Nischenblattfarnes stellen dar das gewaltige Polypodium Heracleum mit über 1½ m langen Wedeln, die aus einem sich kreisförmig einrollenden Stamm entspringen, ferner das Polypodium Meyerianum mit am Grunde nischenartig verbreiterten, aber sonst einförmigen Wedeln, denen sich zahlreiche andere anreihen ließen. Eine der häufigsten Formen von Nischenblattfarnen, im ganzen malayischen Archipel verbreitet,

Digitized by Google

ist das heterophylle Polypodium quercifolium, nach der Form seiner sich alsbald bräunenden Nischenblätter so genannt. Einen Ueberblick über den Aufbau der Pflanze gibt die Figur 12, die ein vom senkrechten Hauptstamm auf einen horizontalen Seitenast übergehendes Exemplar des Farnes zeigt. Die nischenartig abstehenden „Eichen"blätter sind am älteren Stück des Rhizomes am vertikalen Stamm zu erkennen, während sie am horizontalen Aste durch die großen gefiederten Assimilationswedel verdeckt werden. Dieses Polypodium quercifolium erreicht nun in alten Exemplaren eine außerordentliche Ueppigkeit und überzieht ganze Baumstämme von unten bis oben hin, geht auch auf die Aeste über. Ein besonders schönes Exemplar stellt die Figur 13 dar. Ein mächtiger Stamm von Canarium commune in Ternate ist über und über mit dem Polypodium bedeckt, dessen Assimilationsblätter allein sichtbar sind. Ganz ähnlich wie Polypodium quercifolium verhält sich Polypodium rigidulum, nur ist die Pflanze in allen Teilen zierlicher und ist mir niemals in so großen Exemplaren begegnet.

Fig. 12. Polypodium quercifolium.

Fig. 13. Polypodium quercifolium auf einem Canariumstamme in Ternate.

In anderer Weise haben einige große Orchideen sich die Gelegenheit geschaffen, einen künstlichen Boden aus herabfallenden Humusbestandteilen zu bilden. Grammatophyllum speciosum z. B., eine mächtige Orchidee, die in Java heimisch ist, entsendet nach erster Festheftung auf der Stützpflanze alsbald eine Menge von Wurzeln, die jedoch rings um die Anheftungsstelle herum nach außen und aufwärts wachsen. Sie verflechten sich dicht unter starker Nebenwurzelbildung, doch Haupt- wie Nebenwurzeln stellen nach einiger Zeit, wenn sie 10 bis 20 cm (die Nebenwurzeln 2 bis 3 cm) Länge erreicht haben, ihr Wachstum ein, werden steif, verholzt und ihre Spitzen wandeln sich in Dornen um. Ein solches Nest von emporgespreizten, tragfesten Wurzeln vermag ebenfalls eine Menge von Humus aufzustapeln, der dann von neu hervorsprossenden Nährwurzeln durchwachsen und zum Vorteil der Pflanze ausgenutzt wird. Ein besonders mächtiges Exemplar von Grammatophyllum sah ich in Buitenzorg einen dicken Stamm von Canarium mit seinem humussammelnden Nest rings umwachsen, das sicherlich mehrere Zentner Gewicht besitzen mochte. Figur 14 stellt ein relativ bescheidenes Pflänzchen vor, dessen Sprosse immerhin über 1 m Länge erreichten.

5e) Bromeliaceen-Epiphyten. Mehrfach sahen wir im vorhergehenden, daß der Rosettenwuchs der Pflanzen von den Epiphyten für ihre Bedürfnisse in verschiedener Weise ausgenutzt wird. Eine der weitestgehenden Modifikationen, die Rosettenpflanzen für epiphytisches Leben geschickt machen, ist mit den Bromeliaceen vor sich gegangen, die typische Rosettenpflanzen (Fig. 15 und 15a) und dabei die vielseitigsten, zum Teil anspruchslosesten

Digitized by Google

aller Epiphyten sind. Bromeliaceen sind auf Amerika beschränkt. Wo man aber auch tropisch feuchten Wald in Amerika betritt, drängt sich die überwiegende Rolle der Bromeliaceen im Epiphytenbilde auf.

Die Struktur der großen rosettig wachsenden Bromeliaceen, wie Vriesea, Bilbergia, Nidularium u. a. ist hart, dickwandig,

Fig. 14. Grammatophyllum speciosum mit Nestwurzeln.

typisch xerophil. Im Grunde der Rosetten aber, deren Blätter dicht aneinanderschließen, wie Fig. 15 a zeigt, über dem Vegetationspunkte, ist im normalen Leben stets flüssiges Wasser in mehr oder minder großer Menge enthalten, es ist das hineingelangte Regenwasser, das den Becher der Rosette im ganzen Lebensverlauf mindestens feucht erhält. Die Wurzeln der epiphytischen Bromeliaceen sind zu bloßen Haftorganen reduziert; als Aufnahmeorgan für die flüssige Nahrung fungiert das Blatt. Die Blattoberseite, soweit sie dem Trichter angehört, ist bedeckt mit Haarschuppen, die mit einem Stiel tief in das Blatt eingelassen, im trockenen Zustande mit einem rings weit ausgreifenden Rande dem Blatt dicht angeschmiegt sind und, da ihre Oberseite mit starker Cuticula überzogen ist, als vorzüglicher Transpirationsschutz dienen. Bei Benetzung aber hebt sich das Haar und man erkennt, daß der Haarschild auf der Unterseite sehr dünnwandige Zellen besitzt, die das unter den Haarrand tretende Wasser aufsaugen und durch den mit ebenfalls dünnen Zellwänden gegen das Blattinnere abge-

Fig. 15. Bromeliaceenrosetten auf den verschiedenen Stämmen.

Fig. 15a. Nidularium Innocentii. Cisternen-Epiphyt. Nach Schimper.

Digitized by Google

schlossenen Stiel ins Blatt hinein passieren lassen. Die Figuren 16 und 17 werden diese Verhältnisse verdeutlichen, jedenfalls tritt ja in Figur 17 die Differenz in der Wanddicke von Oberflächen- und Innenzellen der Schuppe hervor, während Figur 16 die große Zahl der Zellen, die für den Vorgang in Betracht kommen, und ihre Verbindung mit dem zentral eingesenkten Stiel veranschaulichen. Somit ist es verständlich, daß diese sogenannten Zisternenepiphyten, die stets Wasser in ihren Trichtern an den natürlichen Standorten führen, sich mit Hilfe ihrer Blätter allein mit Nährlösung versorgen und ihr Wurzelsystem lediglich als Haftorgan ausbilden, die Leitungsbahnen also erheblich reduzieren können.

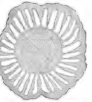


Fig. 16. Haarschuppen von Vriesea. Vergrößerung 340. Nach Schimper.

Fig. 17. Tillandsia usneoides. Schuppenhaar. Vergrößerung 375. Nach Schimper.

Von diesen Zisternenepiphyten leiten sich nun weiter modifizierte Typen ab, die hauptsächlich der Bromeliaceengattung Tillandsia angehören. Es sind teils rosettige zierliche Pflänzchen von grauer Farbe, die jedoch des Wasserreservoirs entbehren und dafür auf ihrer ganzen Oberfläche mit solchen sogenannten Blasebalghaarschuppen bedeckt sind. Dadurch sind sie imstande, außerordentlichen Graden von Lufttrockenheit, die anderen Epiphyten längst verderblich geworden wären, zu widerstehen und bei jedem Regen, bei jedem Taufall mit Hilfe ihrer gesamten Oberfläche Wasser aufzunehmen. Da sie stets an den exponierten Stellen der Aeste und Zweige sitzen und in viele feine Spitzen auslaufen (Fig. 18), wird eine gewisse Wärmeausstrahlung von ihnen ausgehen und bei Annäherung der Wasserdampftension an den Taupunkt, die Kondensation gerade an der Oberfläche dieser Tillandsien am ersten und leichtesten stattfinden, die jede Spur von Wasser sofort in ihr Gewebe einsaugen und es in einer Art von Wassergeweben aufspeichern.

So findet man derart ausgerüstete streng xerophile Epiphyten auch an Orten, die jedes epiphytische Leben ausschließen zu müssen scheinen, wie an den großen Kakteenstämmen der den glühenden Sonnenstrahlen ausgesetzten Hochebene von Tehuacan in Mexiko und anderen ähnlichen Orten.

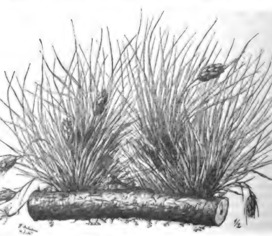


Fig. 18. Tillandsia stricta var. Schlumbergeri, ein ausgesprochen xerophiler und lichtbedürftiger Epiphyt Südbrasiliens. ½ natürlicher Größe. Nach Schimper.

Digitized by Google

Eine weitere Modifikation führt von diesen noch immer rosettig gebauten Pflanzen zu dem eigenartigsten Epiphyten Amerikas, zu der bekannten Tillandsia usneoides (Fig. 19 und 20). Die Pflanze entbehrt der Wurzeln vollkommen. Sie besteht aus einem langen zweizeilig beblätterten Sproßsystem, das zahlreiche Seitensprosse treibt und sich durch Umwinden des Stützastes festhält. Die Blätter und Achsen sind völlig mit den Schuppenhaaren bedeckt und die Pflanze führt zerstreute Wasserzellen im Gewebe, die als Speicher dienen. Die Aufnahme von Tau oder Regen geschieht ebenso wie bei Tillandsia stricta. Diese Tillandsia usneoides stellt eine der eigenartigsten Pflanzengestalten dar, sie blüht selten und ihre Vermehrung geht wohl gänzlich mit Hilfe vom Winde oder von Vögeln abgerissener Zweige vonstatten. In Mexiko reicht sie von der Küste bis aufs Hochplateau, von Florida an begleitet sie den ganzen Golf, indem sie überall an den großen Taxodien lange Schweife und Guirlanden bildet. Habituell gleicht sie am ersten der langen Bartflechte unserer Gebirgsbäume, Usnea, von der sie ihren Namen herleitet.

Auch sonst kennt man ja, um durch den Gegensatz die Sachlage zu klären, lang herabhängende Epiphyten, aber die Bedingungen des Auftretens und die Häufig-

Fig. 20. Zweig von Tillandsia usneoides. $^1/_5$ natürlicher Größe. Nach Schimper.

Fig. 19. Fragment eines Sprosses von Tillandsia usneoides. In natürlicher Größe. Nach Schimper.

Fig. 21. Habitus eines mit Tillandsia usneoides-Schweifen besetzten Baumes im Tal des Grijalva. Chiapas.

Digitized by Google

keit des Vorkommens sind so völlig verschieden, daß darauf besonders hingewiesen werden muß. So stellt die Figur 22 lang herabhängende epiphytische Lycopodien dar, die ebenfalls schweifbildend auftreten möchten. Doch sind sie trotz der Kleinheit ihrer Blätter auf das innerste, feuchteste Gebiet tropischer Waldungen beschränkt, sie würden niemals an Orten, wo die Tillandsia wächst, existieren können. Das wesentliche für die Tillandsia sind eben die ausgezeichneten Schutzmittel gegen Verdunstung, wie die beschriebenen großen Schuppenhaare allein sie wirksam darstellen können.

6. Hemiepiphyten. Hemiepiphyten sind nun derartige Gewächse, die nur zu einer gewissen Zeit ihres Lebens epiphytische Lebensweise besitzen. Zahlreiche Ficusarten, wie Ficsu bengalensis im tropischen Asien, gelangen mit ihren Samen auf hohe Bäume, wo Vögel die fleischigen Früchte verzehren, die harten Samen aber vom Schnabel abgewetzt haben. Gelangen sie hier zur Keimung, so sind sie vorerst auf die vorhandenen Nahrungsstoffe angewiesen, und es ist ja verschiedentlich dargelegt worden, daß daraufhin nur ein bescheidener Lebenshaushalt begründet werden kann. Nun haben aber diese Ficusarten die Fähigkeit, ihre Wurzeln relativ stattlich auszubilden und diese wachsen, nachdem für die Befestigung des Keimlings das nötige geschehen ist, am Stamm des Stützbaumes entlang, abwärts. Meist werden mehrere derartige Wurzeln ausgesandt und wo sie beim Abwärtswachsen einander begegnen, treten sie in Verbindung und bilden einen Ring, der den Stamm umspannt. Bei der spärlichen Ernährung mag es lange dauern, bis die Wurzeln eine größere Strecke zurücklegen können, sie verzweigen sich mehrfach, bilden wieder Verbindungen und so findet der Stützbaum sich bald von einem förmlichen Netzwerk umgeben. Endlich gelangt dann eine oder die andere Ficuswurzel an den Erdboden und dringt in ihn ein. Damit ist die epiphytische Lebenszeit des hoch oben gekeimten Pflänzchens zu Ende und es steht ihm reiche Nahrungszufuhr vom Boden aus zur Verfügung. Das merkt man bald am starken Wachstum der Pflanze, die den Stamm umspannenden Ringe schließen sich fester, oft zu einer förmlichen Röhre zusammen. Die Krone geht mächtig in die Höhe und nimmt dem Wirtsbaume mehr und mehr Licht weg. Ist nun der Wirt ein dikotyler, selbst in die Dicke wachsender Baum, so wird er vom Ficus daran gehindert, der ihn mit seinem Wurzelnetz fest umklammert

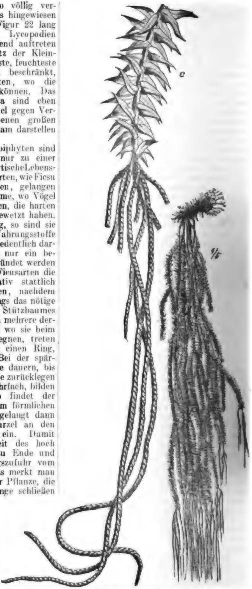


Fig. 22. Lycopodium Phlegmaria. [c natürliche Größe. Nach Schimper.

Digitized by Google

hält. So von Luft und Licht abgeschlossen, geht der Wirt schließlich zugrunde und die Ficuspflanze nimmt jetzt vollständig von dem Raum Besitz. Bei dem genannten Ficus bengalensis senken sich aus den weit überladenden Seitenästen Wurzeln abwärts, die, nachdem sie den Boden erreicht haben, zu weiteren Stützen werden. So nimmt der Ficusbaum bald mehr und mehr Bodenoberfläche in Anspruch, die Stützen umgeben den ursprünglichen erdrosselten Wirtsbaum, an dessen Stelle das primäre Wurzelrohr des Keimlings steht, in immer weiterem Umkreis und schließlich ist aus dem kleinen epiphytischen Keimling ein ganzer Wald hervorgegangen, dessen Bäume alle untereinander zusammenhängen.

Bei dem in Figur 23 gewählten Beispiel ist der Wirtsbaum eine Monokotyle, eine Palme

Fig. 23. Llanoslandschaft mit Copernicia tectorum, letztere zum Teil von epiphytischem Ficus befallen. Venezuela. Nach C. Sachs. Aus Schimper.

die nicht erheblich in die Dicke wächst. Infolgedessen stellen sich üble Folgen für den Wirt erst dann ein, wenn der Keimling, dessen Art unbestimmt bleibt, ihn überwuchert und vom Lichte abschließt, sodaß er seiner Assimilations- und Ernährungsmöglichkeit beraubt wird. So eignet sich der vorliegende Zustand seiner größeren Durchsichtigkeit halber gut zur Demonstration.

Eine zweite Form der Hemiepiphyten geht von Wurzelkletterern aus. Wurzelkletternd ist z. B. unser Efeu. Daß aus dem Efeu niemals ein Epiphyt werden kann, liegt in unserem viel zu trockenen Klima und in der Organisation der Pflanze begründet. Er behält dauernd seinen der Stütze anliegenden, sich nach und nach verdickenden Stamm, der die Verbindung mit dem Boden aufrecht erhält.

Anders bei einigen tropischen Wurzelkletterern. Zahlreiche großblättrige Araceen beginnen ihr Leben als Wurzelkletterer, wie Figur 24 eine solche Aracee an einem

Fig. 24. Junge wurzelkletternde Aracee.

Stützbaum emporkletternd darstellt. Die Blätter sind zunächst ziemlich klein. Beim Höherklettern nehmen sie bereits an Größe zu und stellen sich gegen das von vorn kommende Licht besser ein. So kann es eine Reihe von Jahren fortgehen. Früher oder später aber stirbt der Araceenstamm, der nicht wie unser Efeu in die Dicke zu

Digitized by Google

wachsen befähigt ist, ab, und die Araceenpflanze ist des weiteren auf epiphytisches Leben angewiesen. Das wird ja durch die lange Wegstrecke, die die Pflanze am Wirtsstamm entlang zurückgelegt hat, und die zahlreichen dort ausgesandten Haft- und Nährwurzeln möglich sein, doch fällt die Ernährung dürftiger aus als bisher. Da ist denn vielfach zu beobachten, daß derartig hoch in den Baumkronen sitzende Araceen-Epiphyten lange Wurzeln direkt zum Boden hinabsenden, die wie Taue eine Verbindung der Epiphytenpflanze mit dem Boden neu herstellen. Figur 25 zeigt einen

Fig. 25. Wurzeltaue von epiphytischen Araceen, die in der Krone sitzen. Cafetal Trionfo, Chiapas.

reich mit Epiphyten und mit kletternden Araceen beladenen Baumstamm im mexikanischen Urwald. Hoch in der Krone sitzen weitere, nicht mehr sichtbare epiphytisch gewordene Araceen und zahlreich gehen Taue von ihnen senkrecht zum Erdboden hinab, die zur Ernährung der Mutterpflanzen dienen sollen. Sie haben den Boden bereits erreicht, wie an der straffen Spannung zu erkennen ist, die erst nach ihrer Befestigung im Boden einzutreten pflegt.

Ob dieser Uebergang häufig vorkommt, ist zunächst schwer zu sagen. Es schien mir der Fall zu sein bei dem ebenfalls des Dickenwachstums entbehrenden Sarcinanthus utilis, einer Carludovicacee, die im mexikanischen Regenwalde in Chiapas sehr häufig auftritt, doch ließ sich bestimmtes darüber nicht in Erfahrung bringen.

Nachdem so die epiphytische Vegetation eingehender besprochen ist, wäre noch die Frage zu erörtern, welche Eigenschaften sind nötig, damit eine Pflanze zum epiphytischen Leben gelangt, denn es geht aus der Besprechung klar hervor, daß viele Familien häufig unter den Epiphyten vertreten sind, andere fehlen. Da ist denn hervorzuheben, daß es wesentlich auf die Möglichkeit für die Samen ankommt, in die Baumkrone, oder an dem Stamm hinauf zu gelangen und dort zu haften, denn das ist offenbar die notwendige Vorbedingung für ein solches Leben, dessen Bedingungen selbst ja bereits vorher angegeben sind.

7. Beschaffenheit der Samen und Früchte von Epiphyten. Ueberlegt man sich die verschiedenen Möglichkeiten eines Transportes von Samen oder Sporen in die Höhe der Baumkronen oder der Stämme, so ist einmal der Wind, zweitens die Mithilfe von Vögeln, eventuell auch Affen in Betracht zu ziehen.

Durch den Wind können nur relativ leichte Samen befördert werden, durch Tiere dagegen finden nur derartige Früchte, die als Nahrung benutzbar sind, ein weiteres Fortkommen.

Bei allen Pteridophyten, die so massenhaft epiphytisch auftreten, ist die Leichtigkeit ihrer Sporen der Emporführung durch Wind günstig. Ebenso finden die Orchideen mit ihren winzigen, aber in ungezählter Menge auftretenden Samen auf dieselbe Weise ihre Verbreitung, ohne daß besondere Flugorgane ausgebildet würden. Auch werden die Bromeliaceen, Asclepiadaceen, einige Gesneriaceen und Bignoniaceen dem Winde ihr epiphytisches Vorkommen zu danken haben; sie sind mit Flughaaren oder anderen Flugorganen ausgerüstet, die gleichzeitig die nach oben gelangten Samen nach einem Regenfalle an den Aesten festlegen, und ein Wiederherabfallen hindern.

Dagegen besitzen die Araceen-, die ja zum Teil auch als Wurzelkletterer zur epiphytischen Lebensweise gelangen können, die Ficusarten, Cactaceen, Melastomaceen, Vacciniaceen, Solanaceen, Rubiaceen und ein anderer Teil der Gesneriaceen, um nur die wichtigsten zu nennen, fleischige Früchte, die von Vögeln verzehrt werden, wobei die Samen in den Exkrementen oder durch Ab-

Digitized by Google

wetzen der Schnäbel auf die Baumäste gelangen und dort heimisch werden können.

Damit wäre also gleichzeitig ein Verzeichnis derjenigen Familien gegeben, die nach der Beschaffenheit ihrer Früchte und Samen in erster Linie für epiphytische Lebensweise ihrer Angehörigen in Betracht kommen. Vollständigeres darüber wolle man in der Literatur nachsehen.

Literatur. *Grundlegend ist A. F. W. Schimper, Die epiphytische Vegetation Amerikas. Botan. Mitteil. aus den Tropen 2. Jena 1888. — Derselbe, Pflanzengeographie auf physiologischer Grundlage. Jena 1898. (Hier die seit 1888 erschienenen Ergänzungen und Bearbeitungen anderer Autoren). — Außerdem K. Goebel, Organographie der Pflanzen. Jena 1898. Darin Rekapitulation der Biologie der epiphytischen Moose. — G. Karsten, Biologie der Pflanzen. Im Lehrbuch der Biologie von M. Nußbaum, G. Karsten, M. Weber. Leipzig 1911. — H. Miehe, Javanische Studien II. Untersuchungen über die javanische Myrmecodia. Abh. d. Königl. Sächs. Akad. d. Wiss.; Math.-Naturwiss. Klasse, XXXII, Nr. 4. Leipzig 1911.*

G. Karsten.

Erdalkalimetalle

ist der Sammelname für die Metalle Beryllium, Magnesium, Calcium, Strontium und Barium (vgl. die Artikel „Berylliumgruppe" und „Chemische Elemente").

Erdbeben.

1. Definitionen. 2. Erscheinungsformen: a) Art der Bodenbewegung. b) Wirkungen. c) Schallerscheinungen. d) Lichterscheinungen. e) Zahl und Dauer der Erdstöße. 3. Stärke: a) Intensitätsskalen. b) Lokale Einflüsse. 4. Schüttergebiet: a) Isoseisten und Untergrund. b) Einfluß der Herdtiefe. c) Homoseisten. 5. Epizentrum. 6. Seismometer: a) Allgemeines. b) Seismometertypen. c) Registrierung. d) Theorie der Seismometer. 7. Seismogramme: a) Phasen. b) Typen von Seismogrammen. 8. Seismische Wellen: a) Erdwellen. b) Oberflächenwellen. c) Wege der Wellen. 9. Bestimmung von Hypozentrum und Epizentrum: a) Herdtiefe. b) Epizentrum (makroseismische und mikroseismische Methoden). 10. Seismische Geographie: a) Seismische Gebiete. b) Peneseismische Gebiete. c) Aseismische Gebiete. 11. Entstehungsursachen der Erdbeben: a) Explosionsbeben. b) Einsturzbeben. c) Dislokationsbeben oder tektonische Beben. d) Kryptovulkanische Beben. e) Nachbeben und Schwarmbeben. f) Relaisbeben. g) Extratellurische Auslösung von Beben. h) Seebeben.

1. Definitionen. Unter einem Erdbeben (griechisch seismos) versteht man Erschütterungen der Erdrinde, die in mehr oder minder großer Tiefe der Erdrinde ihren Ausgang nehmen und durch natürliche (nicht künstliche) Vorgänge hervorgerufen werden. Liegt das Schüttergebiet, in dem das Beben vom Menschen gefühlt wurde, auf dem festen Lande, so redet man schlechthin von einem Erdbeben, dagegen von einem Seebeben, wenn es sich auf die ozeanischen Wassermassen beschränkt.

Den unterirdischen Erregungsort (Fig. 1)

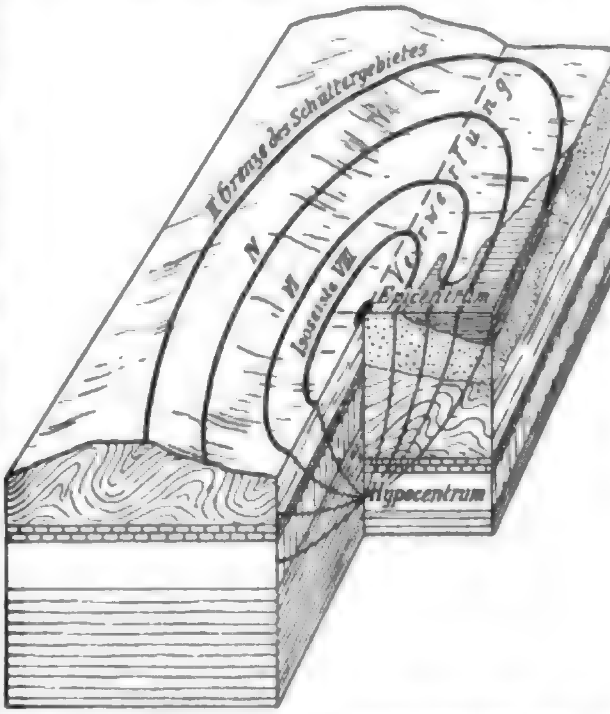


Fig. 1. Modell zur Veranschaulichung der wichtigsten seismologischen Begriffe.

der seismischen Energie nennt man den Bebenherd oder das Hypozentrum. Dagegen wird das Gebiet der Erdoberfläche, das man, im Vergleich mit den übrigen Teilen des Schüttergebietes, als den oberflächlichen Ausgangsort des Bebens aufzufassen hat, als Epizentrum bezeichnet. Im Epizentralgebiet ist die Stärke der Erschütterung durchweg am größten. Hypozentrum und Epizentrum liegen mit mehr oder minder großer Annäherung auf dem gleichen Erdradius.

Die Beben bezeichnet man dort, wo sie körperlich gefühlt werden, als Makroseismen, dort aber, wo sie bloß instrumentell zur Aufzeichnung gelangen, als Mikroseismen.

Die Fortleitung der am Hypozentrum ausgelösten seismischen Energie durch den Erdkörper und längs dessen Oberfläche geschieht durch Elastizitätswellen.

Digitized by Google

In der Erdbebenforschung oder Seismologie beschäftigt sich die geologisch-geographische Richtung vorwiegend mit denjenigen Eigenschaften, die man mit den menschlichen Sinnen wahrnimmt, wohingegen die Arbeiten der physikalisch-mathematischen Richtung auf den instrumentellen Registrierungen der seismischen Wellen basieren.

2. Erscheinungsformen. 2a) Art der Bodenbewegung. Die Art der Bodenbewegung bei den Erdbeben wird je nach den Umständen verschieden empfunden. Unmittelbar über dem Hypozentrum, also in der Nähe des Epizentrums, wiegt die vertikale Komponente der Bewegung vor. Für das menschliche Gefühl macht sich die Erschütterung hier als ein von unten nach oben wirkender Stoß bemerkbar. Mit zunehmender Entfernung vom Epizentrum tritt die Bewegung in der Vertikalen immer mehr zurück, bis schließlich nur noch eine Wellenbewegung in ausgesprochen horizontaler Richtung empfunden wird.

2b) Wirkungen. Die Wirkungen der Erdbeben äußern sich in leichteren Fällen nur in Erschütterungen und Bewegungen von Hausgeräten und sonstigen kleinen Gegenständen; stärkere Beben haben aber Beschädigungen der Gebäude und sogar Veränderungen der Bodengestalt im Gefolge.

Im allgemeinen kann man die Beobachtung machen, daß sich die Erdbeben in den Oberflächenschichten stärker bemerkbar machen als in der Tiefe, z. B. in Bergwerksschächten; mitunter wird allerdings auch das Umgekehrte berichtet.

Für die Menschen von größter Tragweite sind die Bautenbeschädigungen; denn abgesehen von dem materiellen Schaden, den die zusammenbrechenden Häuser und die zerstörten Mobilien bedingen, sind die Verluste an Menschenleben und die Verletzungen fast ausschließlich auf den Einsturz von Häusern zurückzuführen.

Zu den rasch vorübergehenden Veränderungen des Bodens, die lediglich die Oberflächenschicht in Mitleidenschaft ziehen, gehören Sprünge, Risse, Spalten, die in den mannigfachsten Richtungen verlaufen, manchmal sich schneiden und dadurch das Gelände in Schollen zerlegen. Meistens schließen sie sich schon bald von selbst wieder. Reichen die Spalten tiefer, bis in das Grundwasser, so werden Quellen und kleinere Wasserläufe beeinflußt. Eine häufig vorkommende Bildung sind trichterförmige Rundlöcher. Werden aus ihnen oder aus Spalten bei stärkeren Erdbeben schlammige oder sandige Massen ausgeworfen, so bilden diese deckenförmige Ergüsse oder Kegel, die oben kleine Krater besitzen. Bei tiefer gehenden Umgestaltungen der Erdoberfläche entstehen Klüfte, die bei größerer Ausdehnung in die Länge, Breite und Tiefe zu richtigen Verwerfungen werden und mit vertikalen und horizontalen Verschiebungen verknüpft sein können; allerdings sind solche bisher nur auf Inseln (Japan) oder in küstennahen Gebieten (Alaska, Kalifornien) beobachtet worden. Massenbewegungen, wie Erdrutsche, Bergschlipfe und Bodensenkungen treten bei Erdbeben besonders dann auf, wenn der Boden sich aus lockerem oder von Wasser durchtränktem Material zusammensetzt; gehen feste Felsmassen zu Tal, was auch nicht selten beobachtet wird, so redet man von einem Felssturz.

Besonders interessant sind auch die Bewegungen, in die Wassermassen bei Erdbeben geraten. In Seen und Flüssen wallt das Wasser wie bei Sturm, und Wellen schlagen an das Ufer, wie wenn ein Dampfer vorüberführe. Auch kann fließendes Wasser aufgestaut werden.

Speziell bei den Seebeben ist der feste Erdboden dem Blick entzogen. Aber auch der Wasserspiegel gerät sehr oft, selbst bei schweren Beben, sichtbar nicht in Unruhe. Nur die Insassen von Schiffen, die sich im Schüttergebiet befinden, haben das Gefühl, als sei das Schiff aufgelaufen oder auf ein Riff oder Wrack gestoßen. In selteneren Fällen wallt und brodelt das Wasser auf eng begrenzter Fläche auf, vergleichbar kochendem Wasser; mitunter schießen auch einzelne hohe Wellen oder Wassersäulen empor. In einem einzigen Falle konnte beobachtet werden, wie sich die völlig glatte See für die Dauer einiger Sekunden in ihrer ganzen Masse, ohne die geringsten Brecher, aufwölbte und dann wieder glatt wurde wie zuvor.

Am großartigsten und folgenschwersten sind aber die sogenannten Erdbebenflutwellen, die meist bei küstennahen Beben auftreten. Ob sich dabei das Meerwasser zuerst vom Ufer zurückzieht oder ob zuerst ein Ansteigen des Wassers erfolgt, ist noch nicht festgestellt.

2c) Schallerscheinungen. Unter den Erscheinungen, die im Gefolge von Erdbeben aufzutreten pflegen, sind am wichtigsten die Schallphänomene. Am häufigsten gehen diese sogenannten Erdbebengeräusche der Haupterschütterung unmittelbar voraus, manchmal treten sie aber auch gleichzeitig mit ihr auf oder folgen ihr gar nach. Ihre Art wird sehr verschieden angegeben, als Brausen, Pfeifen, Heulen, Rollen, Donnern, Krachen, Brüllen usw., jedoch lassen sie sich als langgezogene und kurz abgebrochene zusammenfassen. Sie kommen in gleicher Weise bei Erd- wie bei Seebeben vor. Die Stärke des Schalles, für deren Schätzung Knett und

Digitized by Google

Davison besondere Skalen aufgestellt haben, steht zu derjenigen der Erschütterung in keiner Beziehung; denn schwache Beben können mit sehr lautem Getöse verbunden sein und umgekehrt. In manchen Gegenden werden sogar unterirdische Geräusche vernommen, ohne daß dabei Bodenerschütterungen zu fühlen sind. Diese sogenannten Bodenknalle führen in den verschiedenen Ländern besondere Namen. Ueber die Natur der seismischen Schallerscheinungen ist man sich noch nicht im klaren; nur soviel ist gewiß, daß sie im Felsgerüste der Erde ihren Ursprung nehmen und in die freie Luft übertreten.

2d) Licht- oder Feuererscheinungen. Licht- oder Feuererscheinungen werden gleichfalls häufig gelegentlich von Erdbeben gemeldet. Es steht aber noch nicht fest, ob es sich dabei nicht etwa um zufällig gleichzeitige Blitze oder Meteorfälle oder gar bloß um Sinnestäuschung handelt. Allerdings könnte man auch an noch ungeklärte elektrische Vorgänge denken.

2e) Zahl und Dauer der Erdstöße. In manchen Fällen besteht das Erdbeben nur in einem einzigen Stoß von kurzer Dauer. Häufig tritt aber eine Reihe von Bodenbewegungen verschiedener Stärke in kürzeren oder längeren Zwischenräumen auf. Bisweilen gehen schwache Stöße voraus, dann folgt der Hauptstoß, und das Ende der Erschütterung bilden wieder allmählich schwächer werdende Schwingungen. Die seismische Störung kann aber auch gleich mit dem stärksten Stoß beginnen und dann in schwächeren Erzitterungen ausklingen. Die Gesamtheit der Erdstöße bezeichnet man in diesem Falle als das Erdbeben, und die Dauer des Erdbebens umfaßt die Zeit, welche vom Anfang der Bewegung bis zum letzen Ausschwingen verflossen ist. Meistens wird die Dauer eines Erdbebens überschätzt.

Auf ein recht starkes Erdbeben folgt sehr häufig eine große Anzahl von sogenannten Nachbeben. Ihre Zahl ist um so größer, je stärker der Hauptstoß und je kleiner die Schütterfläche war. Die Zeit, über welche sich die Nachbeben erstrecken, kann mehrere Jahre umfassen. Mit der Länge der Zeit nimmt aber die Häufigkeit der Nachbeben ab. Das Gebiet, in dem sich die Nachbeben bemerkbar machen, deckt sich nicht immer völlig mit dem Epizentralgebiet des Hauptbebens, weil sich die Epizentren der Nachbeben innerhalb des Hauptschüttergebietes zu verlegen pflegen.

Wird ein und dasselbe Gebiet wiederholt von Erdbeben heimgesucht, so bezeichnet man es als habituelles Stoßgebiet.

Mitunter treten auch in einem Gebiete Erdbeben tage-, wochen- und selbst monatelang auf, wobei sich die schwächeren Stöße mitunter um stärkere gruppieren; in einem solchen Falle spricht man von einem Erdbebenschwarm.

3. Stärke. 3a) Intensitätsskalen. Die Bestimmung der Bebenstärke (seismische Intensität), die jedem Ort im Schüttergebiete zukommt, wird derart vorgenommen, daß man die in die Erscheinung getretenen Bebenwirkungen an der Hand von sogenannten Intensitätsskalen gegeneinander abwägt.

Die Unsicherheit, die durch die Verwendung der Intensitätsskalen bedingt wird, legt den Gedanken nahe, die Bebenstärke durch die Größe der entsprechenden maximalen Bodenbeschleunigung (s. S. 698), so wie sie uns einfache Instrumente angeben, auszudrücken. Vorschläge nach dieser Richtung hin sind bereits mehrfach gemacht worden, und neuerdings hat B. Galitzin eingehender zu dieser Frage Stellung genommen. Jedoch ist es nach der ganzen Sachlage nicht wahrscheinlich, daß im erforderlichen Umfange eine derartige Methode in absehbarer Zeit zur Anwendung gelangt.

Bis vor wenigen Jahren noch waren in den verschiedenen Ländern eine Reihe voneinander stark abweichender Intensitätsskalen in Gebrauch. Ueber die Brauchbarkeit der einzelnen ist mancherlei geschrieben worden. Tatsächlich muß man an eine wirklich brauchbare Skala lediglich die Anforderung einer entsprechenden Anzahl von Skalenteilen stellen, 10 bis 12 Grade erscheinen am geeignetsten; daneben sind die übrigen Merkmale, auf die sich die Bevorzugung der einen oder anderen Skala stützt, belanglos.

In den letzten Jahren hat man sich stillschweigend mehr und mehr auf den Gebrauch einer einzigen Intensitätsskala geeinigt, nämlich auf den der Mercalli-Skala, sei es in der ursprünglichen zehnstufigen Form, sei es in der auf Cancanis Vorschlag um 2 Grade erweiterten. Nachstehend sind die den einzelnen Stärkegraden der Mercalli-Skala entsprechenden Grenzwerte der Beschleunigung angegeben:

			mm/sec^2
I.	Grad:	Instrumentell . . .	2,5
II.	Grad:	Sehr leicht . . .	2,5—5,0
III.	Grad:	Leicht	5—10
IV.	Grad:	Mäßig	10—25
V.	Grad:	Ziemlich stark . .	25—50
VI.	Grad:	Stark	50—100
VII.	Grad:	Sehr stark	100—250
VIII.	Grad:	Zerstörend	250—500
IX.	Grad:	Verwüstend . . .	500—1000
X.	Grad:	Vernichtend . . .	1000—2500
XI.	Grad:	Katastrophe . . .	2500—5000
XII.	Grad:	Große Katastrophe	5000—10 000

In der Praxis hat sich die Knappheit der bisher existierenden Intensitätsskalen als das größte Hemmnis für deren gedeihliche Verwendung erwiesen. Um den störenden bezw. den wahren Sachverhalt fälschenden

Digitized by Google

Einfluß der subjektiven Auffassung auf ein erträgliches Minimum zurückzuführen, hat Verfasser die Kriterien der zwölfteiligen Mercalli-Skala ganz erheblich vermehrt.

Von E. Rudolph rührt eine Intensitätsskala für Seebeben her.

3b) Lokale Einflüsse. Speziell die Bautenbeschädigungen durch Erdbeben werden in ganz erheblichem Umfange durch die Beschaffenheit des Untergrundes mit beeinflußt. Im allgemeinen erweist sich ein Baugrund in seismischer Hinsicht als um so sicherer, je verbandsfester das Gestein ist, was ja so ungefähr mit dessen geologischem Alter parallel geht. Diese Erscheinung findet ihre Erklärung darin, daß in den verbandsfesten Gesteinen lediglich die Erschütterungen zur Geltung gelangen, während in den lockeren häufig Massenverlagerungen (Sackungen, Rutschungen) hinzutreten, die durch die seismischen Wellen ausgelöst werden. Durchaus irrig hat sich aber die weitverbreitete Ansicht erwiesen, die gewöhnlichen geologischen Karten vermöchten uns hinlänglichen Aufschluß über die Beeinflussung der Bebenwirkung durch die Untergrundverhältnisse zu geben. Vielmehr ist die Gesteinsart sowohl wie das Produkt und der Grad ihrer Verwitterung das ausschlaggebende Moment. Beispielsweise geben die kristallinen Gesteine in frischem, unzersetztem Zustande einen sehr bebensicheren Baugrund ab, verwittert aber einen höchst unsicheren. Besonders heftig gestalten sich die Bebenwirkungen, wo lockere Materialien (z. B. tertiäre bis alluviale Ablagerungen) in dünner Schicht festem Gestein aufruhen, weil sich hier die Lockermassen verschieben (Chladnische Klangfiguren), während andererseits mächtige Schottermassen direkt dämpfend wirken. Deshalb pflegen erfahrungsgemäß auf felsigen Höhen die Erdbeben nicht so stark aufzutreten wie in den mit Schwemmland erfüllten Talsohlen. Solche vereinzelte Ruhepunkte im seismisch bewegten Gebiete bezeichnet man als Erdbebeninseln. Durchfeuchtung des Bodens, namentlich infolge von voraufgegangenen Regengüssen, erhöht die Bebenwirkung, da das im Wasser gleichsam schwimmende Lockermaterial eine viel größere Beweglichkeit besitzt als im trockenen Zustande. Den Einfluß der Bodenbeschaffenheit auf die Größe der Zerstörung erkennt man am auffälligsten dort, wo innerhalb einer Ortschaft der Untergrund wechselt.

Auch die topographischen Verhältnisse spielen bei den Bebenwirkungen eine Rolle. So scheinen schmale Gebirgsrücken, vorspringende Felsgrate und Klippen heftiger erschüttert zu werden als die breiten Mulden oder gar als weitausgedehnte Plateaus. Dort, wo tiefe Bodeneinschnitte, selbst Flußbetten, namentlich aber bedeutende Dislokationen vorhanden sind, treten die Oberflächenwellen teils in die Luft über, teils werden sie reflektiert, so daß die auf der entgegengesetzten Seite liegenden Gebietsteile, wenigstens bis auf gewisse Entfernungen hin, von den Bebenwellen unbehelligt bleiben können. Allerdings beobachtet man auch manchmal das gerade Gegenteil, daß nämlich die eintreffenden Bebenwellen auf Verwerfungen reife Spannungen auslösen und damit eine Steigerung der Bebenstärke bedingen.

Ein sprechendes Beispiel liefern die beiden in den Figuren 2 und 3 gegebenen Profile (vgl. dazu auch die Karte Fig. 6), die im Gebiete des mitteldeutschen Erdbebens vom 16. November 1911 die geologisch-tektonischen Verhältnisse und die zugehörigen Beschleunigungen zur Darstellung bringen. Das Profil Fig. 2 zeigt, von rechts nach links, das Sinken der Intensität auf dem kristallinen Massiv des Schwarzwaldes, die Verstärkung auf den Spalten und an kleinen abgetrennten Schollen, sowie die dämpfende Wirkung der mächtigen Schottermassen des Rheintals. Im Profil Fig. 3 gibt sich vornehmlich die Steigerung der Intensität in den nassen Torfböden zu erkennen.

Selbstverständlich kommt der Bauweise hinsichtlich der Bebenwirkungen eine ausschlaggebende Bedeutung zu. So halten nicht nur tief fundierte und gleichsam monolithische Bauten aus armiertem Beton, wie sie in den letzten Jahren mehr und mehr zur Verwendung gelangen, meist den schwersten Beben stand, ohne nennenswerten Schaden zu nehmen, sondern auch die von den Eingeborenen vieler Erdbebenländer aufgeführten leichten, aus nachgiebigem und elastischem Flechtwerk bestehenden Hütten. Andererseits können Erdbeben, die beispielsweise an den in Nord- und Mitteleuropa üblichen Bauten so gut wie schadlos vorübergehen, etwa in Südeuropa oder im Orient eine Katastrophe herbeiführen.

Sogar die Dauer der Erdbeben ist für die Wirkung von Bedeutung; denn ein Beben, das bei kurzer Dauer keinerlei Schaden anrichten würde, kann, wenn es längere Zeit anhält, den Zusammenhang zwischen wichtigen Konstruktionsteilen in gefährlicher Weise lockern.

Für die richtige Beurteilung von Veränderungen der Bodengestalt muß man nicht nur die Untergrundsverhältnisse, sondern auch die Topographie und ganz besonders die vorhergegangenen Witterungsverhältnisse (Durchfeuchtung des Bodens durch Niederschläge, Zermürbung des Gesteins durch Spaltenfrost oder schroffe Temperaturwechsel usw.) gründlich prüfen. Entsprechen doch, um ein ganz nahe liegendes Beispiel herauszugreifen, die lediglich auf Sackung beruhenden Spaltenbildungen in Lockerboden einer viel geringeren seismischen Intensität als solche in festem Fels.

Digitized by Google

4. Schüttergebiet. Beim Studium der Erdbeben spielen die Isoseistenkarten eine wichtige Rolle. Die Isoseisten (vgl. Fig. 1) sind nämlich die Grenzlinien der Fläche mit je dichter die Maschen des Beobachtungsnetzes werden, einen desto unregelmäßigeren Verlauf nehmen die Isoseisten. Daß sie es tun müssen, lehrt schon die Ueberlegung,

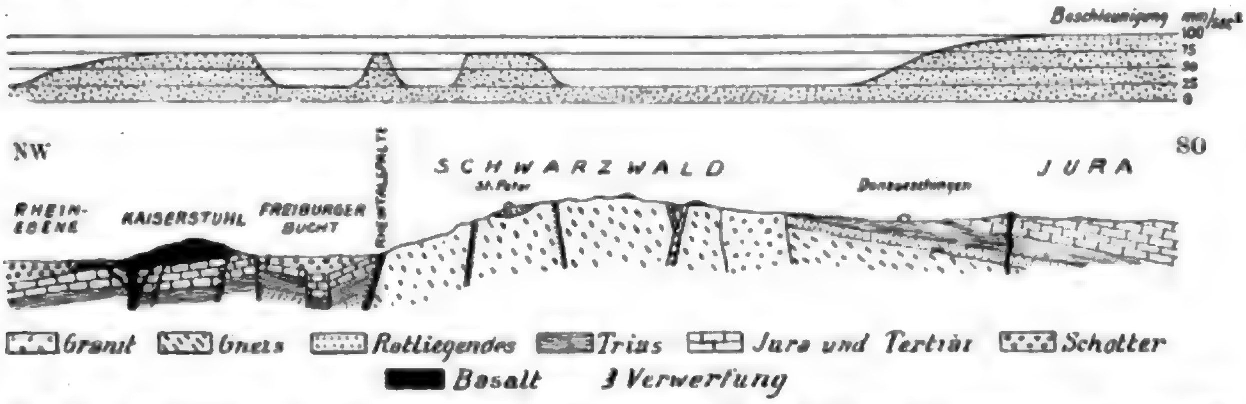


Fig. 2. Einfluß der tektonischen Störungen auf die Bebenwirkungen. Geologisches Profil durch das südliche Baden und Kurve der zugehörigen Beschleunigungswerte für das Erdbeben vom 16. November 1911. Nach Lais und Sieberg.

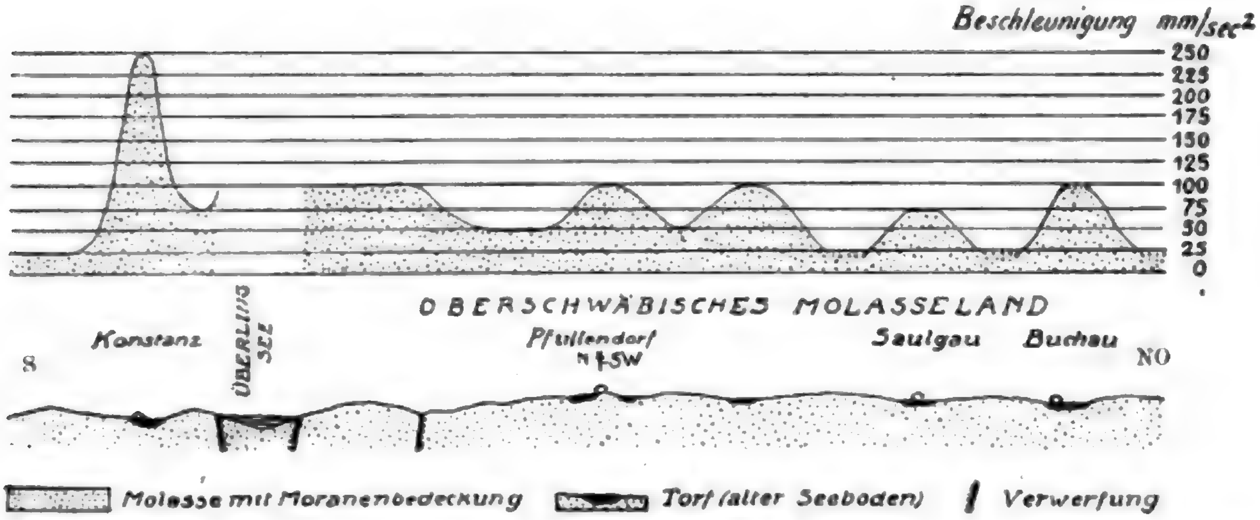


Fig. 3. Einfluß der Gesteinsbeschaffenheit auf die Bebenwirkungen. Geologisches Profil durch das Oberschwäbische Molasseland und Kurve der zugehörigen Beschleunigungswerte für das Erdbeben vom 16. November 1911. Nach Lais und Sieberg.

gleicher Bebenstärke. Im allgemeinen nimmt das pleistoseiste Gebiet, das ist das Gebiet mit den stärksten sichtbaren Bebenwirkungen, in dem auch das Epizentrum zu suchen ist, innerhalb des gesamten Schüttergebietes eine mehr oder minder zentrale Lage ein. Daran schleißen sich, folgeweise an Stärke abnehmend, die übrigen isoseisten Zonen.

4a) Isoseisten und Untergrund. In den älteren und selbst noch vielen neueren Isoseistenkarten begegnet man mehr oder minder regelmäßigen kreisähnlichen oder elliptischen Isoseisten. Derartige Isoseisten kommen aber, vorausgesetzt, daß man dem Beobachtungsmaterial keinen Zwang antut, nur dann zum Vorschein, wenn man bloß über einige wenige, verhältnismäßig weit auseinander liegende Beobachtungsorte verfügt. Je mehr sich aber das Material häuft, daß die Erdrinde sowohl an der Oberfläche als auch in größeren Tiefen nichts weniger als ein homogenes Medium ist. Zeigt doch schon ein Blick auf eine geologische Karte, daß oft innerhalb ganz kleiner Gebiete Gesteinsmaterialien der verschiedensten Art und Struktur miteinander wechsellagern. Zudem muß man sich die Möglichkeit des Wirkens besonderer geologischer oder tektonischer Umstände vor Augen halten, die oft aus dem oberflächlichen Aufbau gar nicht oder nur andeutungsweise erkannt werden können. Dieser stete Wechsel in den Untergrundverhältnissen muß die Fortleitung der seismischen Energie notwendigerweise beeinflussen, und die Erfahrung liefert die schlagendsten Beweise dafür.

Höchst bedeutungsvolle theoretische Grundlagen für die Beurteilung des Einflusses der Gesteinsbeschaffenheit auf die Fortleitung

Digitized by Google

der seismischen Energie bieten vor allem eine Reihe von neueren experimentellen Untersuchungen, die mit Rücksicht speziell auf die Erdbeben von Japanern (Nagaoka, Kusakabe) begonnen und von anderen (Adams, Coker) fortgeführt worden sind. Sie ergeben, daß der Elastizitätsmodul der Gesteine und damit die Fortpflanzungsgeschwindigkeit elastischer Wellen im allgemeinen um so größer ist, einer je älteren geologischen Formation die Gesteine angehören. Dies steht natürlich mit der bereits erwähnten Tatsache in Zusammenhang, daß die sedimentären Ablagerungen der älteren geologischen Epochen fast durchweg härter und kompakter, also verbandsfester sind, als solche, die jüngeren Formationen angehören. Auch erweisen sich nasse Gesteine bedeutend elastischer als trockene. Ferner ist schon seit langem bekannt, daß quer zum Schichtstreichen die Fortpflanzung seismischer Energie weniger schnell erfolgt als in der Streichrichtung. Wenn man dies alles in Erwägung zieht, dann ergibt sich ohne weiteres die Erklärung für eine Reihe von wichtigen, durch zahlreiche Beobachtungen erhärtete Erfahrungstatsachen über die Fortpflanzung der Erdbeben.

So können die Eintrittszeiten eines Erdstoßes an benachbarten Orten verschieden sein, ohne daß ein Fehler in der Zeitbeobachtung vorzuliegen braucht. An Orten, die auf einer Scholle alten Gesteins liegen, ist die Zahl der gefühlten Erdbeben eine größere als an Stationen auf einer mächtigen Lage von jungem und weniger festem Gesteinsmaterial. Die Richtung, aus der die seismische Bewegung eintrifft, kann von der Lage des Epizentrums ganz unabhängig sein, natürlich vorausgesetzt, daß das Epizentrum nicht zu nahe beim Beobachtungsort liegt; in solchen Fällen wird jeder Erdstoß sich aus der gleichen, bestimmten Richtung her bemerkbar machen. Die auf eine alte Scholle auftreffenden Erdbebenwellen werden in ihr besser weitergeleitet, so daß sie nun ihr folgen; deshalb verspüren die dahinter gelegenen Orte die Bewegung bedeutend schwächer oder gar nicht, so daß selbst im Schwemmlande errichtete Gebäude unversehrt bleiben können; sogenannter seismischer Schatten. Den Einfluß von Bodeneinschnitten und Dislokationen, die ebenfalls seismischen Schatten werfen können, haben wir bereits kennen gelernt.

Ein interessantes Beispiel für das Gesagte bieten neuere Untersuchungen von R. Lais über das seismische Verhalten des Kaiserstuhlgebirges in Baden (Fig. 4). Die „seismischen Linien" dieses Gebietes, die hier allerdings keine Isoseisten, sondern ein Ausdruck für Anzahl und Intensität der Erschütterungen (vgl. S. 705) während des Zeitraums 1880 bis 1910 sind, zeigen nämlich die weitestgehenden Analogien mit dem geologischen Aufbau. So gibt die Kurve 40 die stark dämpfende Wirkung von mächtigen Schottermassen zu erkennen, die den festen vulkanischen und sedimentären Gesteinen aufliegen, von denen die Kaiserstuhlbeben den Ausgang nehmen. Sie schmiegt sich recht enge dem Rande des aus der Ebene herausragenden Gebirges an und zeigt dort, wo dies nicht der Fall ist, also im Nordosten (zusammen mit Kurve 20), im Süden und im Südwesten, die Wirksamkeit von Erdbebenbrücken an; letztere sind Massen kompakter Gesteine, die in nur geringer Tiefe unter den Diluvialschottern der Rheinebene verborgen liegen und die Erschütterungen zu dem benachbarten Schwarzwald, dem Tuniberg und den Hügeln von Breisach hinüberleiten. Damit bestätigen die Erdbebenerscheinungen das Vorhandensein unterirdischer Verbindungen, auf das aus geologischen und erdmagnetischen Erscheinungen bereits geschlossen wurde. Kurve 100 umsäumt den nördlichen und westlichen Kaiserstuhl. Sie wird hervorgebracht durch das Wirken zweier gut charakterisierter Herdgebiete. Bei dem ersten, von süd-nördlichem Verlauf, ist die Abhängigkeit von den bedeutenden tektonischen Störungen, die hier festgestellt wird, ganz auffällig. In dem rechtwinkeligen Umbiegen von Kurve 20 und dem parallelen Verlauf mit den beiden Parallelspalten ist sie noch einmal deutlich erkennbar. Auf der Nordostseite zeigt sich der Einfluß der zahlreichen Verwerfungen ebenfalls. Solche von geringer Sprunghöhe, wie die bei Riegel und östlich Malterdingen verlaufenden, bieten stärkeren Stößen kein Hindernis. Dagegen setzt die erste bedeutendere Verwerfung, östlich von Heimbach, den Erderschütterungen ein Ziel; alle Erdbebenorte liegen westlich von ihr. Diese Heimbacher Verwerfung schneidet von den Emmendinger Vorbergen ein langes schmales Stück ab, in dem die Erschütterungen sich zwar weit nach Norden und Süden, aber nur wenig nach Osten hin fortpflanzen können.

4b) Einfluß der Herdtiefe. Hinsichtlich der oberflächlichen Verbreitung der Erdbeben kann man, mit gewissen Einschränkungen, den alten Satz von v. Lasaulx als zu Recht bestehend ansehen, der lautet: Erdbeben mit nur kleinem Verbreitungsgebiet, jedoch von heftiger Wirkung können nur eine geringe Tiefe des erregenden Herdes besitzen. Aber Erdbeben von großem Verbreitungsgebiet und schwachen Wirkungen an der Oberfläche sind in bedeutender Tiefe erregt.

4c) Homoseisten. In früheren Zeiten hat man sich viel mit den Homoseisten (auch wohl Koseisten oder Isochronen genannt) beschäftigt, d. h. mit den Verbindungslinien aller Orte mit gleicher Zeit für den Bebenbeginn. Theoretisch betrachtet müßte man von darauf basierenden Untersuchungen wertvolle Aufschlüsse erwarten dürfen; aber in der Praxis versagen sie wegen der allzugroßen Unsicherheit der Zeitbestimmungen vollständig, und selbst die instrumentellen Registrierungen dürfen heut-

Digitized by Google

zutage noch nach dieser Richtung hin nur mit der größten Vorsicht verwendet werden.

5. **Epizentrum.** Gegenwärtig hört man häufiger den Standpunkt vertreten, es gäbe kein punktförmiges Epizentrum bezw. eine engbegrenzte epizentrale Fläche, welche im Verhältnis zur Größe des Schüttergebietes als punktförmig gelten dürfte. Hiergegen ist folgendes einzuwenden:

Wird das Erdbeben hervorgerufen durch v u l k a n i s c h e E x p l o s i o n e n, dann ist das Hypozentrum mit bestimmten Partien des Vulkanschlotes oder der Eruptionsspalte identisch, worin sich die Explosionen vollziehen. Mithin ist das Epizentrum punktförmig im obengenannten Sinne.

Handelt es sich um ein Beben infolge des E i n s t u r z e s e i n e s H o h l r a u m e s, dann liegt gleichfalls zweifellos ein punktförmiges Epizentrum vor.

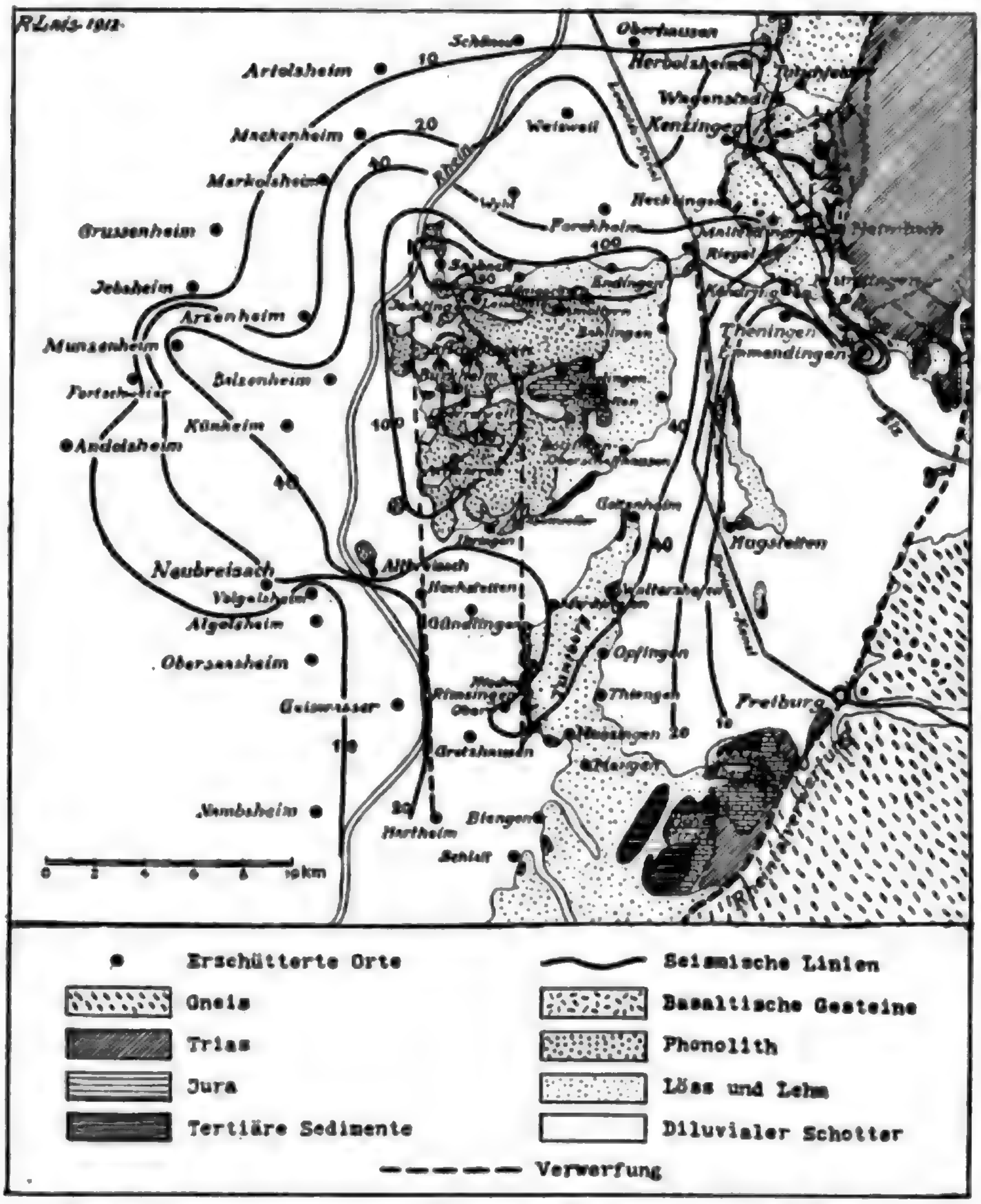


Fig. 4. Seismisch-geologische Karte des Kaiserstuhls. Nach R. Lais.

Bei denjenigen Beben aber, die wir infolge ihrer Entstehung als t e k t o n i s c h e oder D i s l o k a t i o n s b e b e n bezeichnen und die die überwiegende Mehrzahl der Erdbeben ausmachen, liegen die Verhältnisse nicht so einfach. Da lassen sich in der Hauptsache nachstehende zwei Fälle unterscheiden.

Die das Erdbeben auslösende Bewegung beschränkt sich auf die beiden aneinander stoßenden Ränder zweier benachbarter Schollen oder einer neu entstandenen Bruchlinie. Dann ist das Epizentrum, als die Projektion einer mehr oder minder senkrecht in die Tiefe gehenden Bruch- oder Rutschfläche, eine entsprechend lange, oft mehrere hundert Kilometer messende Linie bezw. eine verhältnismäßig schmale, aber langgestreckte Zone. Es ist nun aber als sicher anzunehmen, daß die Schollenbewegung nicht gleichzeitig auf der ganzen Länge der Ver-

Digitized by Google

werfungslinie beginnt. Vielmehr wird die Bewegung an einer ziemlich eng umgrenzten Stelle anfangen und erst allmählich nach beiden Flügeln hin immer weiter abliegende Teile der Dislokationslinie erfassen. Also selbst bei einer weit dahinziehenden Dislokationslinie läßt sich von einem eigentlichen punktförmigen Epizentrum reden.

Ein klassisches Beispiel für ein derartiges Epizentrum bietet das Erdbeben, welches am 18. April 1906 Kalifornien, namentlich aber San Francisco, schwer heimsuchte. Wie aus der Karte von Lawson (Fig. 5) ersichtlich ist,

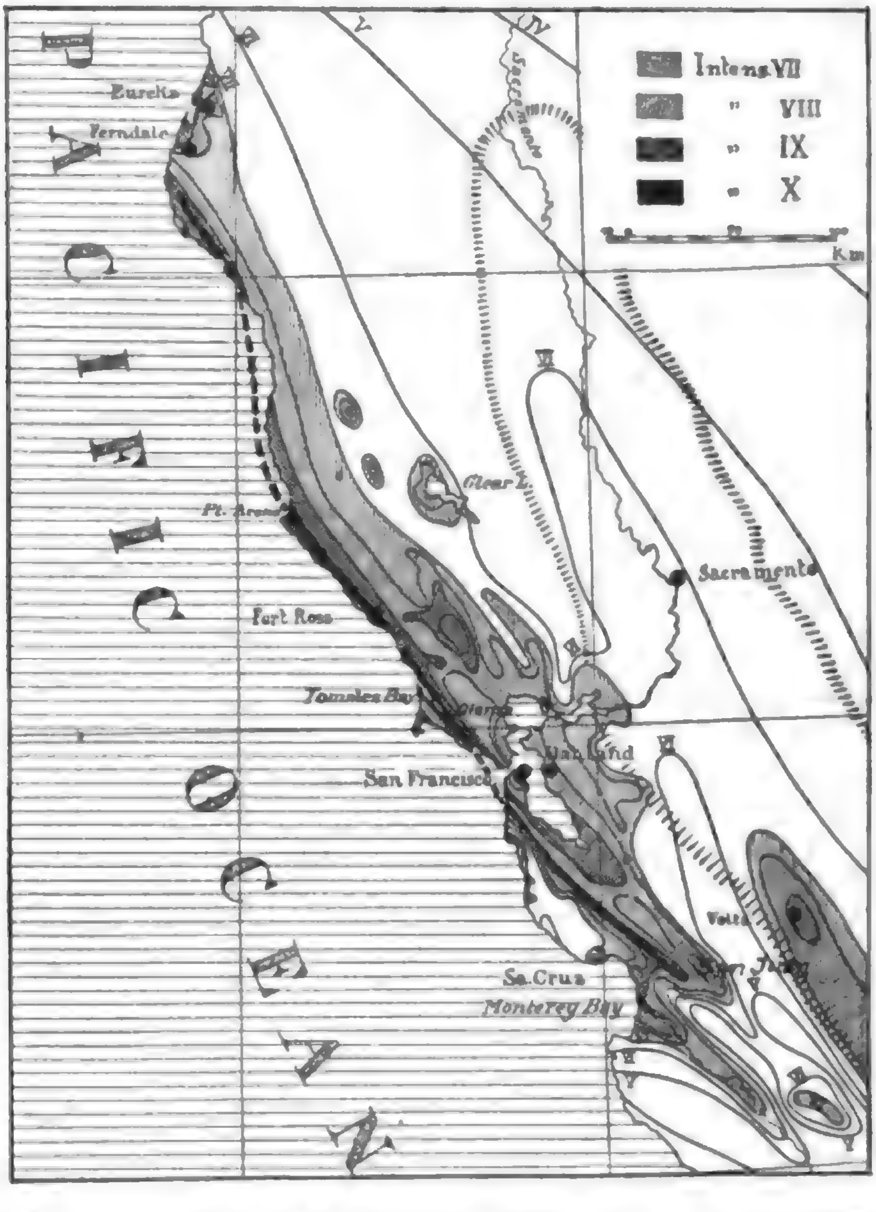


Fig. 5. Isoseistenkarte des Kalifornischen Erdbebens von 18. April 1906. Nach Lawson.

wird die durch die Isoseiste X gekennzeichnete Epizentrallinie durch einen Bruch der Erdkruste an einer Linie oder an einem System von Linien bedingt, die von Point Delgada mehr als 435 km weit bis San Juan verliefen; von Point Arena bis San Juan, d. h. in einer Erstreckung von 300 km, konnten Dislokationen zusammenhängend nachgewiesen werden. Nebenbei bemerkt sind auf dieser Herdspalte, die den Namen San Andreas-Spalte erhielt und der man eine Tiefe von 20 km zuschreiben zu müssen glaubt, relative Horizontalverschiebungen von rund 3 m, teilweise sogar von über 4½ m und an einer Stelle von mehr als 6 m festgestellt worden; dagegen haben die Vertikalverschiebungen, die an nahezu senkrechten Verwerfungsflächen vor sich gingen, anscheinend nirgends den Betrag von ½ m bis 1 m überschritten. Aus vier zuverlässigen Zeitbeobachtungen, und zwar von San Rafael, Mare Island, Berkeley und Mount Hamilton, hat man den primären Ausgangsort des zerstörenden Stoßes zu 38° 03′ N und 122° 48′ W Greenwich bestimmt, ein Punkt, der zwischen Olema und dem südlichen Ende der Tomales-Bay gelegen ist.

Weiterhin kann der Fall eintreten, daß eine größere Scholle oder gar ein Komplex von Schollen von der primären, das Erdbeben auslösenden Bewegung ergriffen wird. Dann komplizieren sich naturgemäß die Verhältnisse in hohem Maße. Sämtliche Schollen bezw. deren Bruchstücke vollführen alsdann Differentialbewegungen gegeneinander, Vertikalverschiebungen oder Schaukelbewegungen, durch die an sämtlichen in Betracht kommenden Verschiebungsflächen seismische Energie ausgelöst wird. Statt eines Epizentrums ist dann eine Vielzahl von Einzelepizentren vorhanden, ein ganzes, über eine größere Fläche verbreitetes Netzwerk. Demzufolge hätten wir unter Umständen mit Epizentren zu rechnen, bei denen zunächst absolut kein Gedanke an einen Vergleich mit einem Punkte aufkommen will. Dennoch ist anzunehmen, daß auch hier schärfere, einwandsfreie Zeitmessungen den Wahn von der Gleichzeitigkeit der Bewegung in dem ganzen System zerstören würden. Der erste Impuls wird auch in diesem Falle von einer einzelnen Stelle ausgehen, jedoch infolge der herr-

Digitized by Google

schenden Spannungs- oder Lagerungsverhältnisse die benachbarten Schollen zu selbständigen Bewegungen reizen. Dann ergäbe sich weiterhin als das wahrscheinlichste, daß das, sagen wir einmal, „primäre“ Epizentrum innerhalb des weiteren „sekundären“ Epizentrums eine mehr oder minder zentrale Lage einnähme. Falls dieser Ideengang das Richtige trifft, hätten wir es auch hier im Grunde genommen mit einem punktförmigen Epizentrum zu tun.

Zur Erläuterung dieser Verhältnisse sei beispielsweise das große mitteleuropäische Erdbeben vom 16. November 1911 herangezogen. Die von Lais und dem Verfasser bearbeitete Karte seines pleistoseisten Gebietes (Fig. 6; vgl. auch Fig. 2 und 3) läßt die Frage nach dem Epizentrum zunächst als aussichtslos erscheinen; gibt sie doch nicht weniger als drei getrennte Gebiete zu erkennen, in denen die Bebenstärke den 7. Grad erreicht und überschreitet. Betrachten wir zunächst das pleistoseiste Gebiet am Bodensee, dann erkennen wir auf den ersten Blick, daß hier die hohen Intensitäten hauptsächlich eine Folge der besonderen Untergrundsverhältnisse sind, daß der schwankende moor- und wasserdurchtränkte Kiesuntergrund, der den alten Seeboden bezeichnet, die Bebenwirkung sehr verstärkte. Die Abstürze und Senkungen im Untersee und in anderen Teilen des Bodensees selbst haben die gleiche Ursache. Auf der Ostseite des Ueberlingersees zeigt sich wieder der verstärkende Einfluß von Verwerfungen. Im zweiten pleistoseisten Gebiet aber, bei Stockach, sind die hohen Intensitätsgrade nur darauf zurückzuführen, daß an den Verwerfungen, die das Einbruchsbecken des Ueberlingersees nach Nordwest fortsetzen, durch die Erschütterungen stärkere Bewegungen ausgelöst wurden. Auch dieses Gebiet kann also nicht für das Epizentrum in Frage kommen. Es bleibt noch als letztes eine Fläche der rauhen Alb, die im Südosten begrenzt ist durch die Absenkung gegen das Molasseland, im Südwesten durch eine Verwerfung, die von Sigmaringen nach Balingen zieht und in den Dornstetter Graben weist, im Nordwesten durch den steilen Erosionsrand der Alb. An den Rändern dieser abgegrenzten Scholle fand eine bedeutende Verstärkung der Bebenwirkungen statt, so daß in der Umgebung von Hechingen, Balingen, Ebingen und Sigmaringen die Intensität den 7. bis 8. Grad erreichte. Es ist hier nicht möglich, lokale Untergrundverhältnisse zur Erklärung heranzuziehen. Wir müssen also innerhalb dieser Scholle das Epizentrum suchen, das dadurch mit einer Unsicherheit von höchstens $\pm$ 20 km festgelegt ist, und senkrecht darunter in großer Tiefe des Hypozentrum. Damit vollständig übereinstimmend geben alle sorgfältigeren Berechnungen, die bis jetzt auf Grund der instrumentellen Registrierungen angestellt wurden, Punkte, die innerhalb derselben Scholle liegen. Durch die Bewegung im tiefgelegenen Bebenherde geriet die ganze Albtafel in Schwingungen, entsprechend $6\frac{1}{2}$—7 Grad Stärke. Die dem Beben-

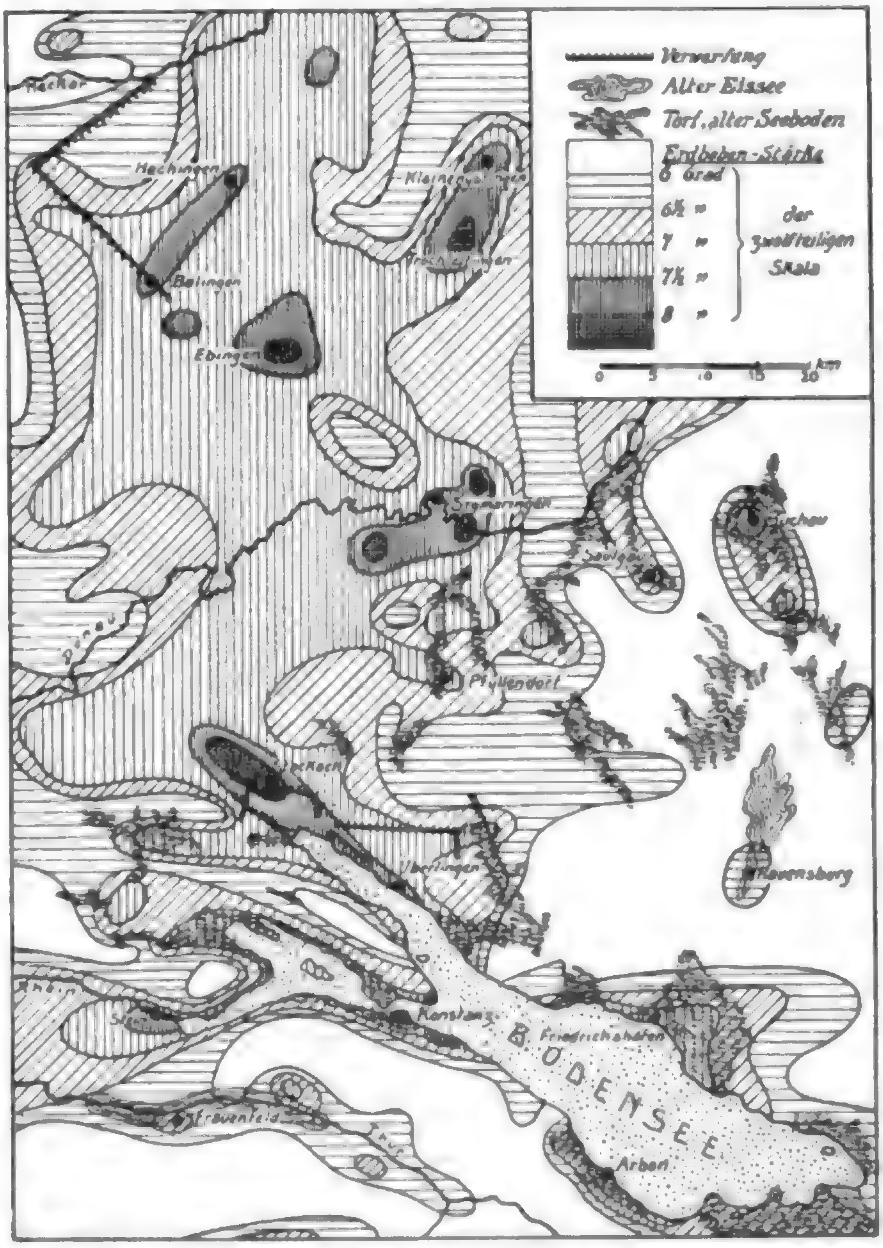


Fig. 6. Mitteldeutsches Erdbeben vom 16. November 1911. Isoseistenkarte des pleistoseisten Gebietes. Nach Lais und Sieberg.

Digitized by Google

herde zunächst gelegene Scholle, die oben näher bezeichnet wurde, zeigt an ihren Rändern ein Anwachsen der Intensität bis zum 8. Grad. Die Wellen, die sich von dort aus nach allen Seiten hin fortpflanzten, lösten zunächst bei ihrem Auftreffen auf die Verwerfungen bei Stockach und am Ueberlinger See verstärkte Bewegungen aus. Das gleiche fand weiterhin u. a. an der Triasscholle des „Bonndorfer Grabens" statt, der von Osten her weit in das Granit- und Gneismassiv des Schwarzwaldes hineingreift; denn hiermit fällt eine Zunge mit Intensitäten von 6 und 6 $^1/_2$ Grad genau zusammen, die in dem schwach (5. Grad) erschütterten Schwarzwald sich scharf hervorhebt. Ebenso bemerkenswert in diesem Sinne ist ferner noch ein langes und schmales, kräftig (6.—7. Grad) erschüttertes Gebiet, das, völlig getrennt vom Epizentrum, den westlichen Schwarzwaldrand begleitet. Es umfaßt die sedimentären Vorberge, die, an der mächtigen Rheintalspalte verworfen, dem kristallinen Gebirge vorgelagert sind, und zeigt die höchsten Intensitäten im allgemeinen auf der Verwerfung selbst.

6. Seismometer. 6a) Allgemeines. Zur instrumentellen Aufzeichnung der Erdbeben bezw. der von ihnen ausgelösten Wellenzüge dienen Registrierinstrumente, die man als Seismometer bezeichnet. Im einzelnen ist die Aufgabe dieser Instrumente die, uns Aufschluß zu geben über die verschiedenen Arten der auftretenden Wellen, ihre Eintrittszeiten am Beobachtungsort und ihre Elemente (Amplitude und Periode).

Die heutzutage im Gebrauch befindlichen Seismometer sind Pendel, denen man zweckentsprechende Form und Hilfsapparate gegeben hat. Im Prinzip ist ein Seismometer folgendermaßen eingerichtet (Fig. 7): Die Bewegungsvorgänge zu einer wellenförmigen Linie auf; gleichzeitig lassen die von einer genau gehenden Uhr jede Minute auf dem Registrierstreifen eingetragenen Zeitmarken die Eintrittszeit einer jeden Welle mit aller Schärfe bestimmen.

6b) Seismometertypen. Neben dem in Figur 7 dargestellten Vertikalpendel-Seismometer benutzt man auch Seismometer mit umgekehrtem Vertikalpendel (Fig. 8), bei denen die in d drehbare Pendelmasse m durch die Kraft der Federn sp in labilem Gleichgewicht erhalten wird, sowie Horizontalpendel-Seismometer (Fig. 9), deren mit dem Draht f aufgehängte Masse m sich mit dem horizontalen Arm b gegen das Drehlager d stützt. Die Wirkungsweise dieser Sonderkonstruktionen ergibt sich an der Hand der Abbildungen ohne weiteres aus dem oben Gesagten. Die Gründe, weshalb man die verschiedenen Typen von Seismometern geschaffen hat, sind rein praktische. Vor allem spielt dabei die Empfindlichkeit der Seismometer eine Rolle, die gemessen wird durch die Amplitude, welche einer Vergrößerung der Schwerkraft um den 206000sten Teil ihrer Gesamtstärke (g = 9780) entspricht. Im allgemeinen wächst sie mit der Pendellänge, der allerdings aus technischen Gründen enge Grenzen gezogen sind. Jedoch erreicht man die gleiche Wirkung durch Verwendung von Horizontal- oder Kegelpendeln, bei denen, wie vorhin (Fig. 9) gezeigt wurde, die Schwingungen der Pendelmasse parallel dem Erdboden um eine annähernd vertikale Achse erfolgen.

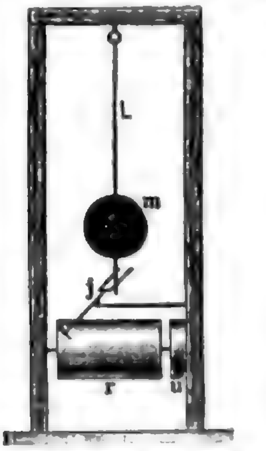


Fig. 7. Schema eines Vertikalpendel-Seismometers.

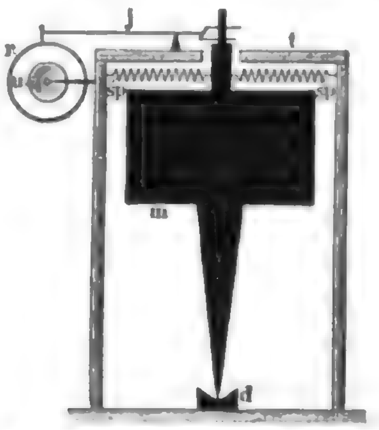


Fig. 8. Schema eines umgekehrten Vertikalpendel-Seismometers.

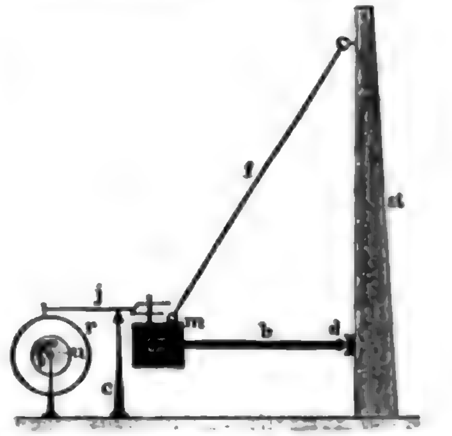


Fig. 9. Schema eines Horizontalpendel-Seismometers.

wegung der an einem Galgen mittels des Stabes L aufgehängten Pendelmasse m wird mittels eines Schreibhebels j, des sogenannten Indikators, auf einen durch ein Uhrwerk u vorwärts bewegten Papierstreifen r ununterbrochen aufgezeichnet. Durch die Vorwärtsbewegung löst sich die Aufzeichnung der Be-

Während beispielsweise Vicentinis Vertikalpendel nur 1,5 m lang ist, entspricht v. Rebeur-Ehlerts Horizontalpendel einem Vertikalpendel von etwa 36 m Länge und Omoris Horizontalpendel sogar einem solchen von 200 m Länge.

Vollständig erhält man die horizontale Bodenbewegung nur dann, wenn man sie in zwei zu einander senkrecht stehenden

Richtungen aufzeichnet. Dies erreicht man am sichersten durch zwei Seismometer, weniger einwandfrei durch eine von Brassart zuerst angewandte Vorrichtung, welche die Bewegung eines einzigen Pendels in zwei zueinander senkrechte Komponenten zerlegt.

Je nachdem der parallel zur Erdoberfläche oder der senkrecht von unten nach oben wirkende Anteil der Erdbebenwellen zur Aufzeichnung gelangen soll, unterscheidet man zwischen Horizontal- und Vertikal-Seismometern (nicht zu verwechseln mit den nach der Art ihrer Aufhängung benannten Horizontal- und Vertikal-Pendeln). Bei den Vertikal-Seismometern (Fig. 10) ist die Pendelmasse p an einer Spiralfeder sp aufgehängt, die sich unter dem Einflusse der Vertikalkomponente der Bodenbewegung verkürzt und verlängert.

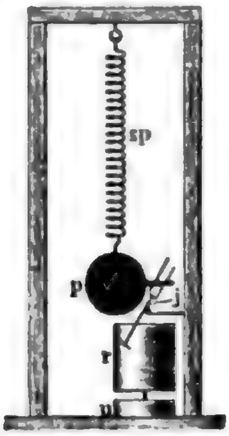


Fig. 10. Schema eines Seismometers für die vertikale Komponente der Bodenbewegung.

Vornehmlich unter Berücksichtigung des Pendelgewichtes scheidet man die Horizontalpendel in schwere und leichte.

6c) Registrierung. Die Registrierung erfolgt bei den Pendeln mit schwerer Masse meist mechanisch derart, daß ein feiner Stift den Ruß von einem mit Ruß geschwärzten Papierstreifen wegkratzt, oder gar einfach mit Bleistift oder Tinte auf einem weißen Papierblatt. Bei kleinen Pendelmassen kann jedoch nur die kostspielige optische (photographische) Registriermethode in Betracht kommen, bei der eine Lichtquelle einen feinen Lichtstrahl auf einen mit dem Pendel schwingenden Hohlspiegel fallen läßt, der dort reflektiert und zu der mit photographischem Papier bespannten Registriertrommel gesandt wird. Galitzin hat außerdem die magnetisch induktive Registriermethode eingeführt. Zu diesem Zwecke ist eine mit der Pendelmasse schwingende Induktionsspule, deren Windungen senkrecht zu denen eines starken Elektromagneten stehen, mit einem Spiegelgalvanometer leitend verbunden. Die bei den Pendelschwingungen in der Spule an Stärke wechselnden Induktionsströme bringen dann den Spiegel des Galvanometers zu entsprechenden Ausschlägen, die optisch aufgezeichnet werden.

6d) Theorie der Seismometer. Für die Auswertung der Registrierungen ist es gleichgültig, welcher Typus von Seismometern vorliegt; denn alle lassen sich durch experimentelle Bestimmung ihrer „Konstanten" auf das „mathematische" Vertikalpendel reduzieren, mit dem sie durch die Gleichung

$$V = J : L$$

verbunden sind. Hierin bedeutet V die Indikatorvergrößerung, L die Pendellänge (Länge des mathematischen Vertikalpendels) und J die sogenannte Indikatorlänge. Außerdem besteht die Beziehung

$$T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}}$$

worin T_0 = Eigenperiode eines Pendels und g die Schwerkraft = 9780 ist. Bestimmt man experimentell T eines beliebigen Pendels, so erhält man durch obige beide Gleichungen die „äquivalente" Pendellänge L des entsprechenden Vertikalpendels und damit die äquivalente (zugehörige) Indikatorlänge J und die Indikatorvergrößerung V.

Obwohl man sich bei den Seismometern daran gewöhnt hat, von Pendelschwingungen zu sprechen, ist diese Ausdrucksweise in Wirklichkeit genommen grundfalsch. Soll doch gerade die Pendelmasse relativ zur Erde völlig unbewegt verharren, stationär bleiben, und dadurch die Differenzialbewegung des sowohl mit ihr, als auch mit dem schwingenden Erdboden verbundenen Registrierwerks ermöglichen, durch die die Bebenregistrierung zustande kommt (Fig. 11). Stationär bleibt aber die Pendelmasse bei

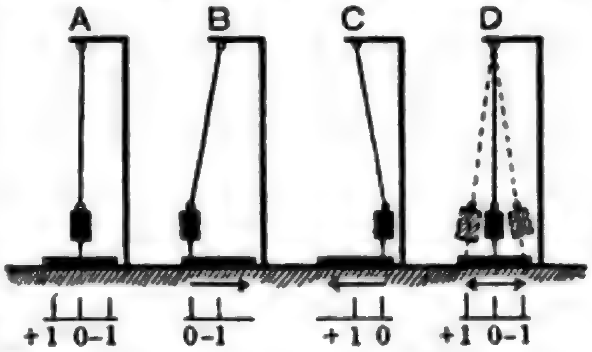


Fig. 11. Die Bewegungen eines Vertikalpendel-Seismometers während eines Erdbebens. A Ruhezustand. B und C während einer Bodenverschiebung in der Pfeilrichtung; die Masse bleibt stationär. D das Pendel ist in Eigenschwingungen geraten.

kleinen und schnellen Horizontalverschiebungen des Erdbodens und der mit letzterem starr verbundenen Aufhängevorrichtung des Pendels nur unter der Voraussetzung eines mathematischen Pendels, bei dem die Pendelmasse als punktförmig und die Masse des Aufhängestabes als im Verhältnis verschwindend klein angesehen werden darf. Da wir es aber in Wirklichkeit mit physischen Pendeln zu tun haben, bei denen die obigen Voraussetzungen nicht zutreffen,

Digitized by Google

so werden die Bewegungsvorgänge viel komplizierter, weil zu den Bewegungen des Erdbodens stets mehr oder minder die erzwungenen Schwingungen des Pendels kommen. Vor allen Dingen überträgt sich nämlich infolge der Reibung in den Aufhänge- und Stützvorrichtungen des Pendels, im Gehänge, die Bodenbewegung auf das Pendel selbst, bringt dieses, anstatt daß es stationär bleibt, zum Mitschwingen (Eigenschwingungen), und zwar in seiner von der Pendellänge abhängigen Eigenperiode. Infolgedessen entspricht das aufgezeichnete Seismogramm nicht mehr der wahren Bodenbewegung, sondern stellt eine komplizierte Wellenlinie dar, die aus der Interferenz, d. h. aus der gegenseitigen Durchdringung der verschiedenen Arten von Bodenwellen mit den Eigenschwingungen des Pendels resultiert. Je nachdem die Erdbebenschwingungen des Pendels in gleichem oder entgegengesetztem Sinne erfolgen, vergrößern oder verkleinern sich im Seismogramm die Schwingungsweiten (Amplituden).

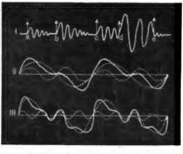


Fig. 12. Kurven von Pendelschwingungen. I Registrierungen eines ungedämpften Pendels, II und III durch Interferenz je zweier verschiedenartiger Wellenzüge entstandene Registrierungen.

Dieses Verhalten veranschaulicht Figur 12. Bei I erlitt das Pendel hintereinander 5 Stöße, und zwar befand es sich jedesmal in Ruhe, als es die Stöße a, b und c empfing; nach jedem dieser Stöße vollführte es infolge der Trägheit noch weitere Schwingungen in seiner Eigenperiode, wobei die Amplitude durch die Reibung allmählich abnahm. Aber noch während der von c hervorgerufenen Eigenschwingungen bekam es in d einen weiteren Stoß in der augenblicklichen Schwingungsrichtung, welcher die Amplitude vergrößerte, und in e schließlich einen der Bewegungsrichtung entgegengesetzten Stoß von solcher Stärke, daß es beinahe zur Ruhe kam. II und III zeigt (dick ausgezogen) einige Wellen, die durch Interferenz verschiedener Wellenzüge (gestrichelt) entstanden sind.

Ein Mittel, den auf solche Weise gegebenen Fehlerquellen zu begegnen, bietet die Anwendung einer Dämpfung, d. h. einer geeigneten Vorrichtung, die, allerdings unter Verkleinerung der Amplituden, dem Pendel die Aufnahme von Eigenschwingungen unmöglich macht, ohne die Empfindlichkeit gegen die Erdbebenwellen störend zu verringern. Als Dämpfungen dienen im allgemeinen Vorrichtungen, bei denen ein mit der Pendelmasse starr verbundener Metallkörper entweder sich in einer Flüssigkeit (Oel, Glycerin) bewegt oder eine abgesperrte Luftmasse zusammendrückt. Neuerdings sind auch magnetische Dämpfungen in Gebrauch, bei denen in einer mit der Masse zwischen starken Magneten schwingenden Kupferplatte Ströme hervorgerufen werden, welche die Schwingungen hemmen.

Uebrigens sei noch darauf hingewiesen, daß ungedämpfte Pendel in vielen Fällen die Einsätze der verschiedenen Phasen der Bewegung mit größerer Sicherheit erkennen lassen als gedämpfte.

Kennt man das experimentell zu bestimmende Dämpfungsverhältnis $\varepsilon:1$, die daraus zu berechnende sogenannte Relaxationszeit τ infolge der Dämpfung und die übrigen vorher genannten Konstanten des Pendels, dann besteht für periodische Schwingungen, also Sinuswellen, die Beziehung

$$\mathfrak{V} = V : \sqrt{\left[1-\left(\frac{T}{T_0}\right)^2\right]^2 + 4\left(\frac{T_0}{2\pi\tau}\right)^2\left(\frac{T}{T_0}\right)^2}$$

Darin ist T die Periode (in Sekunden) der Erdbebenwelle, gemessen im Seismogramm, und V die resultierende Vergrößerung.

Nun ergibt sich schließlich die Amplitude A der wahren Bodenbewegung am Seismometerstandorte nach der Formel

$$A = a : \mathfrak{V},$$

wenn a = der im Seismogramm gemessenen Amplitude (in Millimetern) ist.

Die Amplitude A allein stellt jedoch kein Maß für die Intensität der zerstörenden Kraft des Erdbebens dar. Erst die maximale Beschleunigung $\varDelta g$, welche auch die Periode berücksichtigt, läßt uns diese beurteilen; denn ein Erdbeben wirkt um so verheerender, je größer seine Beschleunigung, d. h. je kleiner die zu größeren Amplituden gehörige Periode der Bodenbewegung ist. Die maximale Beschleunigung berechnet sich nach der Formel

$$\varDelta g = \frac{4A}{T^2} \text{ Milligal}$$

1 Milligal = $^1/_{1000}$ Gal; Gal = Zentimetersekundeneinheit der Beschleunigung; da g = ca. 980 Gal, so ist 1 Gal = ca. 1 Millionteil der Schwerkraft.

Digitized by Google

Im Gegensatz zu den Sinuswellen läßt sich bei kurzen, stoßartigen, unperiodischen Schwingungen die wahre Bodenbewegung nur in ganz roher Annäherung schätzen nach der Gleichung

$$A = \frac{a}{V},$$

worin $V = J : L$ ist.

Die oben in ihren Hauptzügen ganz kurz angedeutete Theorie der Seismometer ist von Schlüter, Wiechert und Galitzin entwickelt worden.

7. **Seismogramme.** Die instrumentelle Niederschrift eines Erdbebens, also das durch die Registrierung festgehaltene genaue Abbild der flüchtig unter dem Seismometerstandorte hindurcheilenden Erdbebenwellen, bezeichnet man als Seismogramm. Durch seine messende Analyse erlangen wir in erster Linie Kunde davon, daß überhaupt ein Erdbeben stattgefunden hat, um welche Zeit sowie mit welchen Perioden und Amplituden die verschiedenen Gruppen von Bebenwellen den Seismometerstandort passierten. Dadurch werden der Wissenschaft selbst solche Erdbeben zugänglich, die in Tausenden von Kilometern Abstand und in unerforschten Gebieten oder gar auf dem Meeresgrunde ihren Ursprung nehmen. Aus den Eintrittszeiten der einzelnen Wellengruppen oder „Phasen“ des Seismogramms berechnet sich der Abstand des Bebenherdes vom Seismometerstandort, daraus wieder rückwärts die Eintrittszeit des Erdbebens am Ausgangsort und die oberflächliche Fortpflanzungsgeschwindigkeit. Wenn sich nun noch, wie es unter Umständen der Fall ist, die Richtung feststellen läßt, aus der die Wellen herkommen, so ist die Lage des Bebenherdes mit ziemlicher Genauigkeit bestimmt. Liegen die seismometrischen Beobachtungen von mindestens drei Stationen vor, dann läßt sich die Lage des Bebenherdes mit mehr oder minder großer Annäherung an die Wirklichkeit angeben; letzteren Punkt werden wir noch eingehender zu würdigen haben.

7a) Phasen. In jedem Seismogramm erkennen wir eine Reihe von charakteristischen Wellengruppen oder Phasen, über deren Bedeutung wir uns in den allgemeinen Zügen klar sind. Allerdings herrscht hinsichtlich sehr vieler Einzelheiten in diesem Bilde noch völlige Ungewißheit. Es treten beispielsweise Wellen und Gruppen von solchen auf, von denen wir nicht einmal immer mit Gewißheit sagen können, ob sie wirklich reelle, durch das Beben ausgelöste Bodenbewegungen abbilden oder ob sie vielleicht durch Eigenheiten des Seismometers oder des Untergrundes an dessen Standort hervorgerufen werden. Manche auch, über deren Bedeutung wir uns bisher noch keine Rechenschaft abzulegen vermögen, scheinen für bestimmte Epizentren in bezug auf den gegebenen Seismometerstandort charakteristisch zu sein, da sie sich, wenn auch etwas modifiziert, an einer Station in allen Seismogrammen des gleichen Epizentrums wiedererkennen lassen. Hier sollen uns aber nur die sicher erkannten Wellenzüge beschäftigen.

Ein in großer Entfernung vom Seismometerstandort aufgetretenes Beben liefert uns das vollständigste Seismogramm (Fig. 13). In einer solchen Registrierung erkennen wir drei voneinander verschiedene Phasen, nämlich die beiden Vorläuferphasen und die Hauptphase. Jede dieser Phasen zeigt

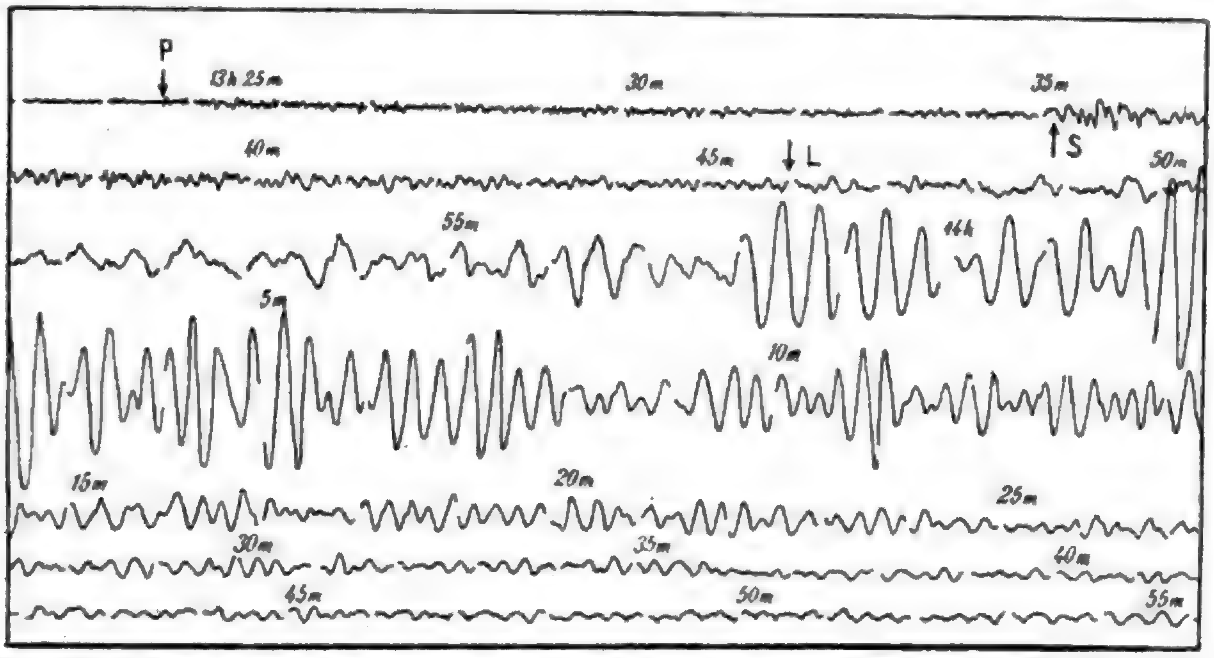


Fig. 13. Seismogramm eines zerstörenden Fernbebens, Epizentralentfernung 9700 km. Kalifornisches Erdbeben vom 18. April 1906, optisch registriert zu Straßburg.

nicht allein andere Wellenelemente, sondern auch verschiedene Fortpflanzungsverhältnisse. Folgendes sind die unterscheidenden Merkmale der drei Phasen:

Die ersten Vorläufer (man bezeichnet sie gewöhnlich abgekürzt als P = primae undae) sind stoßartige, unperiodische Schwingungen von kleiner Amplitude und Periode. Ihre Fortbewegung geschieht am schnellsten.

Die zweiten Vorläufer (S = secundae undae) zeigen etwas größere Amplituden und auch größere Perioden, bewahren aber noch den stoßartigen Charakter. Sie pflanzen sich langsamer fort.

Beiden Wellenarten ist gemeinsam, daß ihre Laufzeit, d. h. die Zeit zwischen dem Stoß im Epizentrum und der Ankunft am Seismometerstandort mit der Entfernung vom Epizentrum wächst; allerdings findet diese Zunahme nicht proportional dem längs der Erdoberfläche gemessenen kürzesten („geodätischen") Abstande statt, sondern in abnehmendem Verhältnis (vgl. die Tabelle auf S. 703). Immerhin kann man zur Charakterisierung der beiden Phasen einen Durchschnittswert der Fortpflanzungsgeschwindigkeit annehmen, nämlich ca. 14 km pro Sekunde für die ersten, ca. 7½ km pro Sekunde für die zweiten Vorläufer.

Die Hauptphase (L = longae undae) setzt sich aus einer Reihe sinusartiger, periodischer Schwingungen von verhältnismäßig langer Periode zusammen; allerdings nehmen gegen das Ende die Perioden allmählich ab. In der Hauptphase tritt auch das Maximum (M = undae maximales) der Bodenbewegung auf, das jedoch nicht mit dem Maximum der Amplitude zusammenfällt. Im Gegensatz zu der Laufzeit der Vorläuferwellen ist die der Hauptwellen proportional dem geodätischen Epizentralabstand; weist doch die Fortpflanzungsgeschwindigkeit einen nahezu konstanten Wert von etwa 3,8 km pro Sekunde auf.

Man muß jedoch im Auge behalten, daß alle hier und weiterhin angegebenen Zahlen lediglich Durchschnittswerte sind, etwa entsprechend den klimatologischen Mittelwerten. Im einzelnen weichen die gefundenen Zahlen mitunter nicht unerheblich hiervon ab aus Gründen, die bisher noch nicht genügend geklärt sind; es scheint allerdings, als ob dem Bebenherd dabei eine ausschlaggebende Bedeutung zukäme.

Infolge der so verschiedenen Fortpflanzungsverhältnisse ist es erklärlich, daß am Seismometerstandorte die einzelnen Wellengattungen zeitlich nacheinander eintreffen, am frühesten die ersten Vorläufer, am spätesten die Hauptwellen; dementsprechend ist auch das Seismogramm ausgebildet. Umgekehrt geben uns aber die Zeitdifferenzen der Phasen im Seismogramm ein Mittel an die Hand, einen Schluß auf die Entfernung des Epizentrums vom Seismometerstandort zu ziehen (vgl. auch Fig. 16).

7b) Typen von Seismogrammen. Unter diesen Umständen ergeben sich folgende Seismogrammtypen.

Fig. 14. Seismogramme zweier Ortsbeben in Straßburg: am 22. Januar 1906 (III. Grad Mercalli), gedämpft; am 9. Januar 1908 (IV. Grad), ungedämpft.

Ortsbeben
(im Epizentralgebiet, Fig. 14).

Einzige Phase: Infolge des kurzen Weges tritt im Seismogramm eine Differenzierung der verschiedenen Wellenarten nicht ein. Jeder einzelne der kurzperiodischen Stöße macht sich als solcher im Seismogramm bemerkbar, worauf das allmähliche Ausklingen der Eigenschwingungen der Scholle einsetzt.

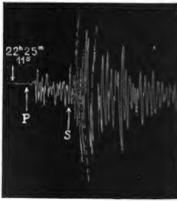


Fig. 15. Seismogramm eines Nahbebens, Epizentralentfernung ca. 250 km, mitteldeutsches Erdbeben vom 16. November 1911, mechanisch registriert in Neuchâtel.

Digitized by Google

Nahbeben
(bis 1000 km Epizentralentfernung, Fig. 15).

I. Phase: P als kurze, stoßartige Wellen, Periode T = 1 bis 6 s, kleine Amplituden; zuweilen sind bereits langperiodische Wellen übergelagert. Kurz nach Beginn setzen als

II. Phase: gleichzeitig auftretend und einander überlagernd S, L und M ein, die langen Wellen (T = etwa 10 s) gleich mit der Maximalbewegung. Ob diese letzteren Wellen anderen von längerer Periode (etwa 20 bis 70 s) überlagert sind, läßt sich schwer aus dem Seismogramm entscheiden.

Mittelweit entfernte Beben
(1000 bis 5000 km).

I. Phase: P, mitunter schon von Wellen langer Periode (30 bis 70 s) überlagert.

II. Phase: S und L gleichzeitig, indem sich S noch die Wellen langer Periode (30 bis 70 s) überlagern. In L Wellen von T = ca. 40 s.

III. Phase: Beginnt mit Wellen, deren Periode schnell von etwa 30 s auf 20 s sinkt; zeigt bald nach dem Beginn das Maximum M bei etwa T = 15 bis 20 s. Je größer die Herddistanz, desto später auch M, weil immer mehr Wellen von 30 bis 50 s auftreten.

Sehr weit entfernte Beben
(über 5000 km, Fig. 13).

I. Phase: P.
II. Phase: S.
III. Phase: L mit Wellen von T = 40 bis 70 s; genauer gesprochen folgen auf S zunächst Wellen sehr langer Periode, die allmählich auf T = 30 bis 25 s sinkt. Dann tritt als
IV. Phase: M bei T = 30 s ein.

Beben aus der Nähe des Gegenpunktes.

I. Phase: P.
II. Phase: S.
III. Phase: M bei T = 40 bis 70 s; diese Wellen halten recht lange an. Erst viel später kommt
IV. Phase: mit Wellen von T = 30 bis 20 s mit dem Maximum der Amplitude (nicht der Bodenbewegung).

Mit weiteren im Seismogramm noch erkennbaren Wellen (Reflexionen und Wellen, die auf dem Wege über den Gegenpunkt eintreffen) werden wir uns späterhin noch beschäftigen.

8. Seismische Wellen. Die Frage nach der Natur der seismischen Wellen ist zurzeit in vollem Fluß und es stehen sich die verschiedensten Auffassungen gegenüber, ohne daß eine derselben uns voll zu befriedigen vermöchte. Schuld daran ist nicht allein der Umstand, daß die klassische Elastizitätstheorie das Problem der Erdbebenfortpflanzung nicht erschöpfend zu behandeln vermag, sondern auch die geringe Güte mancher Beobachtungen, die in Ermangelung von besseren bisher als Ausgangspunkt

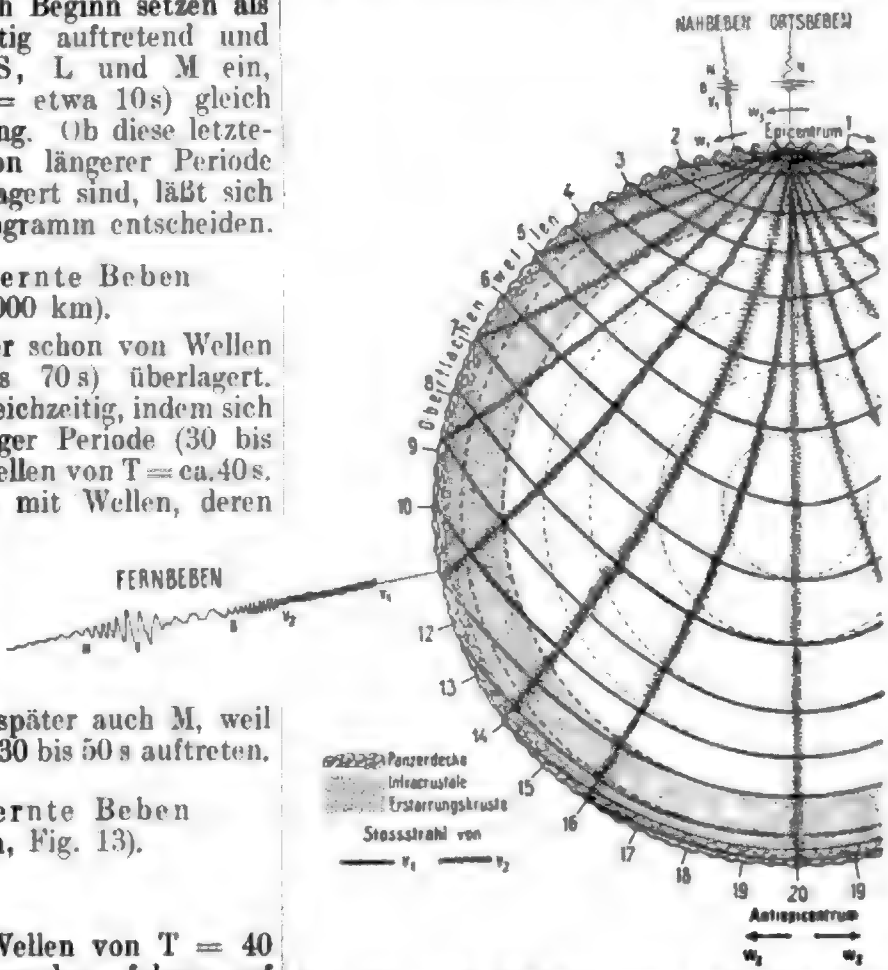


Fig. 16. Die Fortpflanzung der seismischen Wellen und ihr Erscheinen im Seismogramm (V_1 = erste, V_2 = zweite Vorläufer).

dienen mußten. Infolgedessen müssen wir uns an dieser Stelle damit begnügen, kurz diejenige Anschauung zu entwickeln, die heute den meisten Beifall findet, während andere Auffassungen nur hin und wieder kurz gestreift werden können.

Als Ganzes betrachtet, darf man den Erdball in einer für unseren Zweck hinreichenden Annäherung als elastisches, isotropes Medium auffassen, da die die Gesteinskruste zusammensetzenden Einzelkristalle regellos und richtungslos durcheinander gewürfelt sind. Die in einem solchen Medium entstehenden Erschütterungen bezeichnet man als Elastizitätswellen. Ihre Fortpflanzung vom Erregungsherde aus erfolgt, ähnlich derjenigen des Lichtes, in kugelähnlichen geschlossenen Wellenzügen. Diese Wellenflächen werden in der Seismologie als homoseistische Flächen bezeichnet, und ihre Schnittlinien mit der Erdoberfläche bilden die bereits erwähnten Homoseisten. Der Weg, den die Energie vom Ausgangspunkte bis zu einem beliebigen Beobachtungspunkt

Digitized by Google

zurücklegt, steht auf sämtlichen homoseistischen Flächen senkrecht und heißt Stoßstrahl; für ihn ist also die Laufzeit ein Minimum. Mit der Erdoberfläche schließt der dort austretende Stoßstrahl den Emergenzwinkel ein.

8a) Erdwellen. Gelangt im Innern eines elastischen Körpers eine Erschütterung zur Auslösung, so entstehen zwei Gattungen von Wellen, die sich von dem gemeinsamen Zentrum aus unabhängig voneinander ausbreiten. Die eine Wellenart sind die auf Volumveränderung beruhenden Verdichtungswellen (auch normale oder Kondensationswellen genannt), also longitudinal, in der Richtung der Fortpflanzung schwingende Wellen. Dazu gesellen sich dann noch transversal, also senkrecht zur Fortpflanzungsrichtung, schwingende sogenannte Scherungswellen (Distorsionswellen); das charakteristische Merkmal der Scherungswellen, im Gegensatz etwa zu den in Kreisbahnen schwingenden Wasserwellen (Gravitationswellen), ist, daß die elastische Verschiebung der Teilchen, die sogenannte Schubdeformation, in gerader Linie senkrecht zur Fortpflanzungsrichtung längs paralleler Seiten erfolgt. Infolge ihrer verschiedenen Geschwindigkeit, die nach der Theorie annähernd im Verhältnis 13 : 1 steht, trennen sie sich um so weiter voneinander, je größer die Entfernung vom Ursprungsort ist.

Unter den bei den Erdbeben sich durch den Erdkörper hindurch fortpflanzenden Erdwellen haben wir die ersten Vorläufer als die sich am schnellsten fortpflanzenden Longitudinalwellen aufzufassen, während wir in den zweiten Vorläufern die langsameren Transversalwellen erblicken werden. Diese Auffassung erscheint uns ungezwungener als die von Láska vertretene, wonach die zweiten Vorläufer reflektierte Longitudinalwellen sein sollen.

8b) Oberflächenwellen. Wenn die vorbesprochenen Wellen auf eine Unstetigkeitsfläche, insbesondere die freie Oberfläche des elastischen Körpers, treffen, rufen sie dort eine dritte Wellengattung komplizierten Charakters hervor, die sich über die Oberfläche ausbreitet. Diese von Lord Rayleigh zuerst erkannten Oberflächenwellen scheinen also beim Erdbeben vom Epizentrum auszugehen. Man bezeichnet sie als die langen Wellen der Hauptphase, weil sie in beträchtlicher Entfernung vom Epizentrum gewöhnlich die größten Schwingungen des Erdbodens veranlassen und deshalb im Seismogramm am stärksten ausgebildet erscheinen.

Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Rayleigh-Wellen ist allgemein von den Elastizitätskonstanten des Mediums abhängig und gewöhnlich kleiner als die der Transversalwellen. Bei den Erdbebenwellen hat sie, wie wir sahen, den Wert von etwa 3,8 km pro Sekunde. Dieser Wert ist nun zwar für die an der Erdoberfläche liegenden Sande, Lehme und ähnliche weiche Bodenarten zu groß. Indessen können wir annehmen, die Fortpflanzung der Hauptwellen erfolge längs der harten und kompakten archäischen und paläozoischen Gesteine, die den Unterbau der festen Erdkruste bilden; alles was darüber liegt, schwingt einfach passiv mit.

Die Oberflächenwellen nehmen, wenn man das Epizentrum als Pol betrachtet, bis zum Aequator an Energie ab, von dort aber bis zum gegenüberliegenden Pol, dem Gegenpunkt (Antiepizentrum), wieder zu, weil sich eben die gleiche Energiemenge folgeweise auf immer größer und dann wieder kleiner werdende Flächen verteilen muß. Da aber außerdem ein Teil der Energie auf dem langen Wege durch Absorption, also Umsatz in eine andere Energieform (Wärme) verloren geht, so beträgt nach Angenheister die im Gegenpunkte gesammelte Energie nur noch den 490. Teil der ursprünglichen (= $^1/_{22}$ der Amplitude der wahren Bodenbewegung). Nunmehr übernimmt das Antiepizentrum die Rolle des Epizentrums; die von ihm ausgesandten Oberflächenwellen, die sogenannten W_2-Wellen, weisen bei ihrer Rückkehr am Epizentrum nur noch den 242500. Teil der ursprünglichen Energie (= $^1/_{490}$ der Amplitude) auf. Dieses Hin- und Zurückströmen zwischen Epizentrum und Antiepizentrum hält so lange an, bis sämtliche Energie aufgebraucht ist; jedoch konnten schon W_3-Wellen nur selten mehr in Seismogrammen gefunden werden.

Noch verwickeltere Bewegungsvorgänge enthüllen uns aber die Seismogramme. Da lagern sich z. B., namentlich den Hauptwellen, sekundäre Wellenzüge anderer Periode über, so daß häufig die Normalwelle kaum mehr zu erkennen ist. Dabei spielen Eigenschwingungen ganzer Erdschollen, die von den seismischen Wellen angeregt werden, sowie mancherlei sonstige geologische Verhältnisse eine im einzelnen auch noch nicht andeutungsweise geklärte Rolle. Ferner sind in den Seismogrammen häufig mehrfache Reflexionen der an die Erdoberfläche gelangten Wellenzüge nachzuweisen, die so mannigfaltige und komplizierte Verhältnisse darbieten, daß hier nicht näher darauf eingegangen werden kann.

8c) Wege der Wellen. Die Vorläufer pflanzen sich, im Gegensatz zu den Hauptwellen, direckt durch das Erdinnere fort. Dafür sprechen in erster Linie die Laufzeiten (vgl. nachstehende Tabelle). Denn diese wachsen, wie bereits erwähnt wurde, zwar mit der geodätischen Entfernung vom Epi-

zentrum, aber nicht proportional dieser Distanz, sondern in abnehmendem Verhältnis. Dies zeigt, daß sie zuerst in die Tiefe steigen, wo sie schneller fortgeleitet werden, und dann wieder emportauchen. Ferner ist kein Gestein der Erdkruste imstande, elastische Schwingungen mit Geschwindigkeiten von 10 und mehr km pro Sekunde fortzuleiten.

Laufzeiten nach Wiechert-Zöppritz.

Epizentralentfernung	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	Megameter*)
Laufzeit P.	120	260	360	440	510	570	630	690	740	790	840	890	930	Sekunden
Differenzen		140	100	80	70	60	60	60	50	50	50	50	40	„
Laufzeit S.	240	460	640	790	910	1030	1140	1250	1350	1450	1540	1620	1700	„
Differenzen		220	180	150	120	120	110	110	100	100	90	80	80	„

*) 1 Megameter = 1000 km.

Die Form des Stoßstrahls bei den Vorläufern zu kennen, ist wichtig für die Ableitung der Fortpflanzungsverhältnisse im Erdinnern. Aber da fehlen uns noch jegliche sicheren Angaben. Die Japaner vertreten die Ansicht, alle Phasen pflanzten sich parallel der Erdoberfläche, aber in verschiedenen Tiefen, fort, die ersten Vorläufer in den untersten Schichten. Jordan kommt auf Grund von mehr als 400 Registrierungen bei 10 Beben zum Schluß, daß für die ersten Vorläufer vorderhand die Annahme einer geradlinigen Fortpflanzung (ca. 12 km pro Sek.) den Beobachtungen am besten entspräche. Die meisten Deutschen nehmen, nach dem Vorgange von A. v. Schmidt, gegen das Erdinnere konvexe Stoßstrahlen an, was auch uns als das plausibelste erscheinen will; ganz Ausführliches darüber findet sich in einer Reihe von Arbeiten von Wiechert, Zöppritz und Geiger (Göttinger Nachrichten, von 1907 an).

9. **Bestimmung von Hypozentrum und Epizentrum.** 9a) Herdtiefe. Für die ganze Theorie der Erdbeben wäre es das wichtigste, wenn sich die Tiefe des Herdes eines jeden Bebens, also des Hypozentrums, einwandfrei ermitteln ließe. Die Mittel und Wege dazu können selbstverständlich, wenigstens soweit sich dies heute beurteilen läßt, nur die instrumentellen Registrierungen liefern. Wir haben aber oben gezeigt, daß wir über die physikalischen Verhältnisse in den Erdtiefen und damit über die Fortleitungsverhältnisse der seismischen Energie noch recht im unklaren sind. Das gleiche gilt auch für die Beeinflussung der Fortpflanzung durch den geologisch-tektonischen Aufbau der Gesteinskruste. Und solange dies der Fall ist, können wir keine der bisher gebräuchlichen Methoden für die Berechnung der Herdtiefe (Dutton, v. Schmidt, Rudzki, v. Kövesligethy, Janosi, Saderra Masó) hinsichtlich ihres Wertes oder Unwertes gerecht beurteilen. Ein weiteres Eingehen auf diese Frage erübrigt sich deshalb, zumal die verschiedenen Methoden ganz voneinander abweichende Werte ergeben.

9b) Epizentrum. Eine kaum geringere Bedeutung, in theoretischer Hinsicht sowohl wie in praktischer, kommt der Festlegung des Epizentrums zu. Aber über den Genauigkeitsgrad der hierfür zu Gebote stehenden Methoden bestehen Meinungsverschiedenheiten. Seit dem Aufschwung, den im letzten Jahrzehnt die Seismometrie nahm, hat immer mehr die irrige Meinung Platz gegriffen, die ganze Zukunft der Seismologie beruhe einzig und allein auf den instrumentellen Registrierungen; über den seismischen Wellen wurden die Erdbeben selbst fast ganz vergessen. Trotz der großen Bedeutung der Seismometrie, die nicht im geringsten verkannt werden soll, muß doch auf Grund zahlreicher Erfahrungen vor der jetzt üblichen Ueberschätzung der mikroseismischen und der Vernachlässigung der makroseismischen Beobachtungen nachdrücklich gewarnt werden. Wenn beispielsweise das Epizentrum auf Grund der instrumentellen Fernbebenregistrierungen berechnet wird, dann erhält man, trotz der anscheinend so genauen geographischen Koordinaten desselben, die manchmal sogar bis auf Bogensekunden angegeben werden, Werte die nur in seltenen, günstigen Fällen eine Genauigkeit von ± 100 bis 200 km aufweisen. Daß schon eine solche Unsicherheit für alle Detailarbeit in seismogenetischer Hinsicht zu groß ist, leuchtet ohne weiteres ein. In den weitaus meisten Fällen, zumal wenn es sich um bedeutendere Epizentralentfernungen handelt, ist die Unsicherheit ganz erheblich größer, nämlich einige hundert Kilometer, und mitunter wandert das berechnete Epizentrum, je nachdem man Stationen auswählt, in geradezu verblüffender Weise umher. Eine eindringliche Sprache redet namentlich auch die Untersuchung, in der O. Klotz für das Jahr 1911 seine Berechnungen der Epizentren mit denjenigen von Galitzin und Zeißig verglichen hat; dabei ergaben sich nämlich Unterschiede, die durchweg

Digitized by Google

hoch in die hunderte Kilometer gehen. Die Ursache dieser Erscheinung ist zunächst darin zu suchen, daß die Analyse der Seismogramme, selbst wenn diese von einwandfreien und gut besorgten Instrumenten gewonnen werden, sehr oft einer Subjektivität in der Auffassung unterworfen ist, die einen für den vorliegenden Zweck zu großen Spielraum läßt. Dazu kommt, daß der Zeitdienst meist noch sehr im argen liegt; erst in allerletzter Zeit scheint er in Deutschland einen erfreulichen Aufschwung durch die Verwertung der Funkentelegraphie zu nehmen. Dies alles trägt mit dazu bei, die Laufzeitkurven und die von diesen abgeleiteten Formeln, die ja die Grundlage für die Berechnung bilden, recht unsicher zu gestalten. Eine wichtige Einschränkung muß allerdings gemacht werden: Wenn das Epizentrum eines kräftigen Bebens in großer Nähe von einer Reihe in jeder Hinsicht erstklassiger Seismometerstationen umgeben ist, wie etwa dasjenige des mitteldeutschen Erdbebens vom 16. November 1911, dann muß natürlich die Epizentralberechnung an Zuverlässigkeit gewinnen. Alles in allem genommen kommt man zu folgendem bedeutungsvollen Ergebnis: Die mikroseismische Epizentralbestimmung leistet gute Dienste zur ungefähren Lokalisierung eines Bebenherdes. Namentlich ist sie von Wichtigkeit in den zahlreichen Fällen, in denen wir von einem Beben lediglich die instrumentellen Aufzeichnungen, nicht aber sein Schüttergebiet kennen, weil es entweder in weit entfernten und wenig zugänglichen Landgebieten oder gar auf dem Meeresboden liegt; denn selbstverständlich dürfen auch solche Beben für die Wissenschaft nicht ganz verloren gehen. Aber alle Untersuchungen, die den Zusammenhang der Erdbeben mit den einzelnen Zügen im Antlitz der Erde zum Gegenstande haben, dürfen sich nur auf solche Erdbeben stützen, die genau makroseismisch erforscht sind.

Für die makroseismische Bestimmung der Epizentren lassen sich keine allgemein gültigen Regeln aufstellen, vielmehr kann es sich hierbei nur um sinngemäße Anwendung der zahlreichen bisher mitgeteilten Erfahrungstatsachen auf den einzelnen Fall handeln.

Die mikroseismische Epizentralbestimmung hingegen ist an besondere Methoden gebunden, die hier kurz angedeutet werden sollen.

Setzen wir zunächst den Fall, man verfüge lediglich über die Registrierungen einer einzelnen Station. Dann müssen wir zunächst die Epizentralentfernung (Δ) aus den Zeitunterschieden der Phaseneinsätze bestimmen. Bei Fernbeben kann man diese Rechnung mit hinlänglicher Genauigkeit im Kopfe vornehmen nach der sogenannten Laskaschen Regel, die besagt:

$$(S-P) \text{ Minuten} - 1 = \Delta \text{ Megameter}$$

d. h. in Worten: die in Minuten ausgedrückte Differenz der Eintrittszeiten der zweiten und ersten Vorläufer, vermindert um eine Einheit, ergibt die Epizentralentfernung in Megametern (1 Megameter = 1000 km). Beispielsweise ergibt eine Dauer der ersten Vorphase von 10,7 Minuten eine Epizentralentfernung von 9700 km.

Genauere Werte erhält man, indem man die zur Zeitdifferenz (S—P) gehörigen Kilometer aus nachstehender Tabelle entnimmt; beispielsweise (S—P)=9 m 55 s, Epizentralentfernung 8700 km. Zwischenwerte können interpoliert werden.

Differenzen (S—P) der Eintrittszeiten der zweiten und ersten Vorläufer. Nach den Laufzeitkurven von Wiechert und Zöppritz bearbeitet von Zeißig.

km	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
	m s	m s	m s	m s	m s	m s	m s	m s	m s	m s
0	0 11	0 22	0 33	0 44	0 55	1 06	1 16	1 27	1 38	1 48
1 000	1 58	2 08	2 18	2 27	2 37	2 46	2 56	3 05	3 14	3 23
2 000	3 32	3 40	3 49	3 57	4 05	4 13	4 21	4 28	4 36	4 43
3 000	4 50	4 58	5 05	5 10	5 17	5 24	5 30	5 35	5 41	5 47
4 000	5 53	5 58	6 04	6 10	6 15	6 20	6 26	6 31	6 37	6 42
5 000	6 48	6 53	6 58	7 04	7 09	7 15	7 20	7 25	7 31	7 36
6 000	7 41	7 47	7 52	7 58	8 03	8 08	8 13	8 19	8 24	8 29
7 000	8 34	8 39	8 44	8 50	8 55	9 00	9 05	9 10	9 15	9 20
8 000	9 25	9 30	9 35	9 40	9 45	9 50	9 55	10 00	10 05	10 10
9 000	10 16	10 20	10 25	10 30	10 35	10 40	10 45	10 49	10 54	10 58
10 000	11 02	11 07	11 11	11 16	11 20	11 24	11 29	11 33	11 37	11 41
11 000	11 45	11 49	11 53	11 57	12 01	12 05	12 09	12 13	12 17	12 21
12 000	12 25	12 28	12 32	12 36	12 39	12 43	12 46	12 49	12 53	12 56

Bei Nahbeben bedient man sich zweckmäßig der Formel von Conrad, die sich auf die Zeitdifferenz der Hauptwellen und der ersten Vorläufer (L—P)=t, in Sekunden ausgedrückt, stützt. Sie lautet

$$5{,}8 + 8{,}09\ t - 0{,}009\ t^2 = \Delta \text{ km}$$

Zur Vereinfachung hat man hiernach die auf der folgenden Seite gegebene Tabelle berechnet.

Um jetzt das Epizentrum zu finden, braucht man nur in einer Landkarte oder auf einem Globus nachzusehen, wo in der betreffenden Entfernung Erdbebenherde liegen. Gute Dienste tun in dieser Hinsicht Karten, die nach dem Vor-

Digitized by Google

Differenzen (L—P) der Hauptwellen und der ersten Vorläufer.

L—P =	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Sek.
Δ =	14	22	30	38	46	54	62	70	78	86	km
L—P =	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	Sek.
Δ =	125	164	202	240	278	315	352	388	424	459	km
L—P =	65	70	75	80	85	90	95	100	Sek.		
Δ =	494	528	562	595	629	661	693	725	km		

gange von Grablovitz die Linien gleicher Entfernung vom Beobachtungsort und die Kurven der wichtigsten Azimute enthalten, zumal wenn sie, wie die vom Verfasser für Straßburg herausgegebene, zu einer morphologisch-seismischen Weltkarte ausgestaltet ist. Allerdings ist das Resultat kein eindeutiges, weil sich gewöhnlich eine Anzahl von Erdbebengebieten in der gegebenen Entfernung befinden. Sind von dem Beben zwei zueinander senkrechte Komponenten der Bewegung registriert und die ersten Einsätze völlig scharf ausgebildet, dann läßt sich nach der von Galitzin, Zeißig und anderen durchgearbeiteten Methode auch noch das Azimut des Bebenherdes gegen den Seismometerstandort berechnen. Durch das Hinzutreten der Richtung, aus der die Wellen eintreffen, wird natürlich das Epizentrum eindeutig bestimmt.

Verfügt man über die Registrierungen von wenigstens drei Stationen, dann bedarf man zu einem eindeutig bestimmten Epizentrum keiner Azimutberechnungen mehr, sondern lediglich der Epizentralentfernungen und der geographischen Koordinaten der Stationen. Die Berechnung selbst stellt sich alsdann dar als eine einfache Aufgabe der sphärischen Trigonometrie. Stehen die Beobachtungen von mehr als drei Stationen zur Verfügung, dann muß man das Ausgleichsverfahren nach der Methode der kleinsten Quadrate zu Hilfe nehmen. Trotzdem durch zahlreiche eigens für diesen Zweck berechnete Hilfstabellen (z. B. von Szirtes) die Berechnung erheblich vereinfacht wird, bleibt sie doch noch recht zeitraubend. Infolgedessen sucht man in neuester Zeit mit gutem Erfolg die rechnerischen Methoden durch rein graphische Methoden zu ersetzen. O. Klotz hat einer derartigen, von E. Rosenthal herrührenden Methode zu weiterer Verbreitung verholfen, die auf der Verwendung besonders vorgerichteter Kartenblätter in stereographischer Projektion beruht; sie setzt mindestens drei Stationen voraus, kann aber auch mehr Stationen berücksichtigen. Mainka hat außerdem den einfach zu handhabenden Brillschen Apparat für äronautische Ortsbestimmungen, der auf der in der Astronomie gebräuchlichen Methode der Standlinien basiert, für die Epizentralbestimmung geeignet und diese damit zu einer ganz einfachen mechanischen Arbeit gemacht.

10. Seismische Geographie. Einen besonders lehrreichen Einblick in die Entstehungsursachen der Erdbeben muß uns zweifellos die geographische Verteilung der Erdbeben gewähren, wenn wir sie mit dem geologisch-tektonischen Aufbau in Parallele stellen. Den Grundstein hierzu legten namentlich österreichische Geologen, in erster Linie R. Hoernes und E. Sueß, während F. de Montessus de Ballore diese Kenntnisse nicht nur erweiterte, sondern auch zum ersten Male zu einem die ganze Erde umfassenden Gesamtbilde vereinigte.

Für derartige Untersuchungen wäre es wertvoll, einen zahlenmäßigen Ausdruck für die seismische Tätigkeit eines Ortes oder einer Gegend zu finden, wobei allerdings der Grundsatz als unerläßliche Vorbedingung zu gelten hätte, daß jedes der dort aufgetretenen Beben bekannt wäre, und daß ferner nur die gleichen Zeiträume miteinander verglichen würden. Montessus hat seine Formel, nach der er früher die „Seismizität" eines Gebietes bestimmte, selbst aufgegeben. Heutzutage unterscheidet er:

Seismische Gebiete, in denen die Erdbeben häufig sind und mehr oder minder zerstörend wirken;

peneseismische Gebiete, in denen sie bei wechselnder Häufigkeit stark auftreten, und

aseismische Gebiete, in denen die Erdbeben schwach und selten oder gar unbekannt sind.

Wenn wir auch den von Montessus vorausgesetzten Parallelismus zwischen der Stärke und der Häufigkeit der Beben nicht als allgemein gültig anerkennen können, so wollen wir uns doch sein Einteilungsprinzip zu eigen machen.

Uebrigens sei noch bemerkt, daß in neuester Zeit Lais die Seismizität eines Gebietes folgendermaßen mißt, und zwar mit gutem Erfolge (vgl. die Karte Fig. 4): Für einen nicht zu kurzen Zeitraum werden alle Orte des zu prüfenden Gebietes ausgewählt, die jedesmal dann, wenn sie erschüttert wurden, eine zur Intensitätsbestimmung geeignete Nachricht liefern. Statt der Intensitätswerte werden die ihnen in der Mercalli-Cancani-Skala entsprechenden Beschleunigungswerte (vgl. die Tabelle S. 689) eingesetzt und die für sämtliche Erschütterungen des betreffenden Ortes gebildete Summe derselben, reduziert auf ein Jahr, als Ausdruck seiner Seismizität genommen.

Im allgemeinen findet Montessus, die Erdrinde werde nahezu ausschließlich innerhalb zweier schmaler Zonen erschüttert, die mit zwei großen unter den von E. Haugh rekonstruierten mesozoischen Geosynklinalen zusammenfallen. Da letztere aber von den Geologen noch lebhaft

umstritten werden, so wollen wir hierbei nicht länger verweilen, sondern in kurzer Zusammenfassung das seismische Verhalten der einzelnen Gebietsteile auf Grund der letzten Forschungsergebnisse näher betrachten.

10a) Seismische Gebiete sind in erster Linie eine schmale Störungszone der Erdrinde, die in west-östlicher Richtung von Europa gegen Ostasien hinzieht. Das ganze Mittelmeerbecken, der Persische Meerbusen, das Rote Meer und die ganze nördliche Hälfte des Indischen Ozeans sind gewaltige Einbruchsbecken der Erdrinde, die, zum Teil recht weit, in das Festland eingreifen. Nach Norden schließen sich lange, bogenförmige Stränge von jungen Faltengebirgen an sie an, wie die Pyrenäen, Alpen, Apennin, Karpathen, Dinaren, Kaukasus und Himalaya, die von den niedersinkenden und gleichsam wie ein Keil wirkenden Schollen gegen die starren Tafeln des Vorlandes gepreßt und so immer höher aufgestaucht werden (s. die Artikel „Gebirgsbildung" und „Gebirge der Erde"). Die andere Zone fällt mit dem zirkumpazifischen Zerrungsgebiet (v. Richthofen) zusammen, also mit den Küstengebieten des Großen Ozeans bezw. mit den den Westküsten vorgelagerten Inselketten (Aleuten, Japan, Formosa, Philippinen, Malayischer Archipel, Salomon- und Tongainseln, sowie Neuguinea). Daß wir es hier mit Senkungsvorgängen in der Erdrinde zu tun haben, lehren uns die langen Reihen der ozeanischen Gräben, die die Küsten und Inselreihen des Großen Ozeans, namentlich im Westen, begleiten (s. den Artikel „Meere"). Diese schmalen, die größten Meerestiefen aufweisenden Gräben bezeichnen den Bruchrand des pazifischen Senkungsfeldes und sind gleichzeitig der Sitz der stärksten Erdbeben. Der Antillenbogen, der in seinem Bau große Aehnlichkeit mit der ostasiatischen Inselguirlande zeigt, sowie das Südufer des durch Dislokationen entstandenen Baikalsees sind ebenfalls hierher zu rechnen. Unter den Seebebengebieten ragt besonders die seismische Zone des St. Paulsfelsen im äquatorialen Atlantik hervor, wo zweifellos der Vulkanismus eine Rolle spielt. Die übrigen lebhafter tätigen Seebebengebiete stehen im großen und ganzen mit den vorbesprochenen tektonischen Verhältnissen in offensichtlichem Zusammenhang.

10b) Peneseismische Gebiete stellen die Randfalten der Schollenländer dar, wie der Ural, das Vorland des Altai, die Australischen Alpen usw., ferner die Rümpfe abgehobelter Faltengebirge, in denen sich in jüngerer Zeit Brüche vollzogen haben, so die Kaledonischen, die Armorikanisch-Variscischen Falten mit der als Grande Faille du Midi bekannten riesigen Verwerfung bezw. dem französisch-belgisch-westfälischen Kohlenbecken, das Rheintal zwischen Bonn und Bingen, die Mainzer Tertiärbucht, der Oberrheinische Graben, das Erzgebirge mit seiner verwirrenden Tektonik, in Syrien die jungtertiären Grabenbrüche des Jordans mit dem Toten Meere, die Appalachen Nordamerikas, Madagaskar, sowie der ostafrikanische Anteil des Großen Grabens. Im Kapland haben wir es mit gewaltigen staffelförmigen, der Küste parallelen Abbrüchen im Faltengebirge zu tun; desgleichen ist peneseismisch das von Brüchen, auf denen zahlreiche heiße Quellen emporsteigen, durchzogene Land der Hereros, sowie die längs west-östlich streichender Brüche absinkende Küstenzone der Goldküste. Die Seebeben des Indischen Ozeans sind an eine Grabenversenkung geknüpft, deren Horste im Westen durch Madagaskar, die Seychellen, bis nach Ceylon hinüber, im Osten durch die linienförmig angeordneten Koralleninseln der Lakkadiven, Malediven und Tschagos-Inseln kenntlich werden. Auch an der Neufundlandbank haben wir es in ähnlicher Weise mit einem absinkenden Horste zu tun, während an der Südspitze der Iberischen Halbinsel zwei Brüche im Verlaufe der Küstenlinie einander kreuzen. Senkungsfelder sind weiter das Ligurische Meer, das Tyrrhenische Becken, die Adria, das Marmarameer und das Schwarze Meer.

10c) Aseismische Gebiete sind in erster Linie die alten Schollenländer, sowie die von den Faltenästen umklammerten Plateaus, wie die zentralen Hochflächen von Kolumbien und Alaska, das Koloradoplateau, das Bolivianische Plateau und die Küsten des Roten Meeres. Der eigentliche Nordatlantische Kessel ist so gut wie bebenfrei, ebenso der ganze mittlere Teil des Großen Ozeans, wo sich einzig und allein bei den Hawaii-Inseln Seebeben vulkanischen Ursprungs bemerkbar machen.

11. Entstehungsursachen der Erdbeben. Auf Grund ihrer Entstehungsursachen werden die Beben nach dem Vorgang von R. Hoernes, E. Sueß und F. Toula heutigentags fast allgemein in folgende drei Gruppen zusammengefaßt.

11a) Explosionsbeben. Zunächst sind die verhältnismäßig seltenen Beben zu nennen, die mitunter, aber nicht immer, die Vulkanausbrüche begleiten. Diese Explosionsbeben müssen zurückgeführt werden auf das stoßweise Anschlagen des im Eruptionsschlot oder -spalt heraufdrängenden Magmas gegen die überlagernde Gesteinsdecke, das zudem an der Oberfläche stark entgast; sobald die Gesteinsdecke geborsten ist und den Eruptionsprodukten den Weg freigibt, lassen die Erdstöße gewöhnlich schnell an Heftigkeit nach. Hierher zu rechnen sind aber auch die versuchten Eruptionen, wie etwa das zerstörende Erdbeben, das am 15. Oktober 1911, drei Wochen nach der Beendigung einer starken Spalteneruption des Aetna, die Ostseite dieses Vulkans heimsuchte. Allerdings werden in alten, längst erloschenen Vulkangebieten auftretende Beben gerne als mißglückte Eruptionsversuche angesehen, während sie sich bei näherem Zusehen als rein tektonische erweisen. Erfahrungsgemäß bleiben Explosionsbeben, selbst bei großer Heftigkeit, nur auf den Vulkan selbst oder seine unmittelbare Nähe beschränkt.

11b) Einsturzbeben. Eine weitere Art von ebenso seltenen wie ganz lokalen Beben läßt sich auf den Zusammenbruch unterirdischer, durch Auswaschung oder sonstige natürliche Vorgänge entstandener

Digitized by Google

Hohlräume zurückführen, wie sie vor allem in Kalkgebirgen (z. B. im Karst) angetroffen werden. In diesem Falle redet man von Einsturzbeben.

11c) Dislokationsbeben oder tektonische Beben. Die weitaus größte Zahl von Erdbeben, darunter sämtliche, die ein ausgedehntes Schüttergebiet aufweisen, sind eine Begleiterscheinung des Prozesses der Gebirgsbildung; man bezeichnet sie als Dislokationsbeben oder tektonische Beben. Sie allein werden zu sogenannten Weltbeben, indem ihre Wellen allerorten die empfindlichen Seismometer in Tätigkeit versetzen.

Wird das innere Gleichgewicht der Erdrindenschollen durch die gebirgsbildenden Kräfte auf irgendeine Weise gestört, sei es durch den Faltungsprozeß, durch Absinken, Aufsteigen oder Schaukelbewegung von Schollen, die Entstehung neuer oder die Erweiterung vorhandener Spalten usw., so treten plötzlich und ruckweise senkrechte und wagerechte Verschiebungen, Verwerfungen und Rutschungen der einzelnen Gesteinsschichten auf, oftmals verbunden mit einem Brechen und Nachstürzen der Gesteinsmassen. Die gleitende Reibung an den rauhen Seitenflächen der Gesteinsschollen löst die elastischen Bebenwellen aus. Infolgedessen ist selbst der langsamste Faltungs- und Senkungsvorgang nicht ohne eine zahllose Menge von einzelnen Erschütterungen denkbar. Es gewinnt übrigens den Anschein, als ob reichlich in den Gesteinsklüften zirkulierendes Wasser durch mechanische Fortspülung und chemische Lösung die Beweglichkeit der Schollen vergrößere; denn in manchen Bruchgebieten folgen Erdbeben gerne auf heftige Regengüsse oder plötzliche Schneeschmelze. Aber nur vereinzelt hinterlassen solche unterirdischen Vorgänge eine äußerlich sichtbare Spur; größere meßbare Dislokationen bei Gelegenheit von Erdbeben scheinen auf küstennahe (Alaska, Kalifornien) oder Inseln durchsetzende Bruchzonen beschränkt zu bleiben und in Faltungsgebieten nicht vorzukommen. Wenn aber die Verwerfung, wie es gewöhnlich der Fall ist, an der Erdoberfläche nicht sichbar wird, so beruht dies lediglich darauf, daß lockeres, zertrümmertes und verstürztes Gesteinsmaterial einen viel größeren Raum einnimmt als das feste Ausgangsgestein. Hobbs vertritt, in manchen Fällen zweifellos mit vollem Recht, die Ansicht, auch die unter dem Deckgebirge verborgenen Erdbebenspalten (Bruchlinien), die er seismotektonische Linien nennt, ließen sich aus den sichtbaren Bebenwirkungen in ihrem Verlaufe festlegen; namentlich sollen die Orte stärkster Bebenwirkungen die Schnittpunkte von zwei oder mehr seismotektonischen Linien charakterisieren. Wirklich zeigte auch, wie wir sahen, das mitteldeutsche Beben vom 16. November 1911 ganz ausgesprochen Steigerungen der seismischen Intensität auf Verwerfungen, namentlich auf einzelnen Schnittpunkten von solchen.

Uebrigens drängt sich uns ohne weiteres auch die Vermutung auf, die Verteilung der Schwerkraft in der Erdrinde, namentlich aber die lokalen und regionalen Schwereanomalien, sowie die damit eng verknüpften Störungen des Erdmagnetismus müßten in der Erdbebentätigkeit einer Gegend zum Ausdruck gelangen. Die wenigen bisher in dieser Hinsicht durchgearbeiteten Fälle lassen Wechselbeziehungen dieser drei Naturkräfte erkennen, erlauben aber weder eine Verallgemeinerung, noch einen genügenden Einblick in die Ursachen. Besonders deutlich tritt dieser Zusammenhang zutage, wenn man nach dem Vorgang von Riccò für Unteritalien und Sizilien die Karten der Schwereverteilung und der erdmagnetischen Elemente mit Barattas seismischer Karte vergleicht; dann sieht man, wie in der Nachbarschaft der Bebengebiete die Kurvenzüge sich dicht aneinander drängen und mancherlei Ablenkungen von der normalen Richtung erleiden. Deutlich erkennbar war die Ursache des Zusammenhanges zwischen der Form eines Erdbebenschüttergebietes und dem Verhalten des Erdmagnetismus in einem Falle, den Lais anführt. Ein Erdbeben, das den vulkanischen Kaiserstuhl erschütterte (Fig. 17), war nämlich fast völlig auf die festen, besonders die basaltischen Gesteine dieses Gebirges beschränkt, griff aber im Südwesten erheblich darüber hinaus und erschütterte hier noch einige Orte der aus losen Schottern aufgebauten Rheinebene. Ganz dasselbe Verhalten zeigt die Horizontalintensität; die von der Isodyname 0,20 CGS eingeschlossene Fläche überschreitet das vulkanische Gebirge nach derselben Richtung (Fig. 18). Nach G. Meyer sind solche Gebiete verminderter Horizontalintensität auf das Auftreten isolierter Basaltberge zurückzuführen. Erdbeben und Erdmagnetismus lassen hier also erkennen, daß im Südwesten des Kaiserstuhls ein aus Basalt bestehender Bergrücken in geringer Tiefe unter dem Diluvium verborgen liegt.

Von Milne und Cancani wurde gezeigt, daß die Zahl der großen Weltbeben mit der Größe der Verschiebungen des Erdpols zu- und abnimmt, daß ferner die größere Zahl dieser Beben auf die Zeiten der Richtungsänderungen bei den Polverschiebungen fällt. Eine genaue Analyse der Poländerungen soll die Uebereinanderlagerung zweier periodischer Bewegungen zu erkennen geben, von denen das eine Glied durch Massenverlagerungen im Erdinnern infolge von Erdbeben bedingt würde. Aber auch über diese Frage sind die Akten noch lange nicht geschlossen.

Digitized by Google

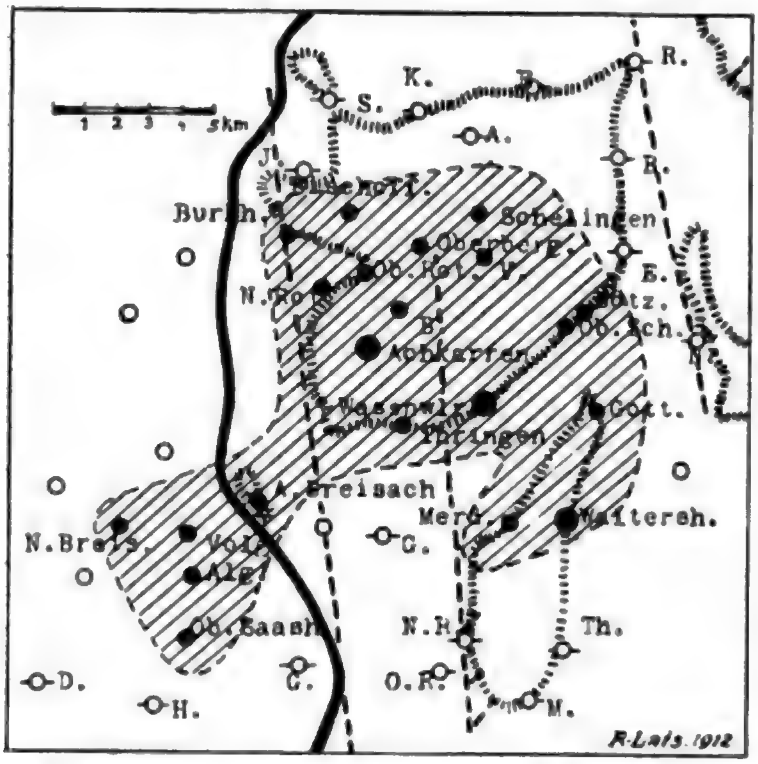


Fig. 17. Schüttergebiet des Kaiserstuhlbebens vom 21. Mai 1882. Nach R. Lais.

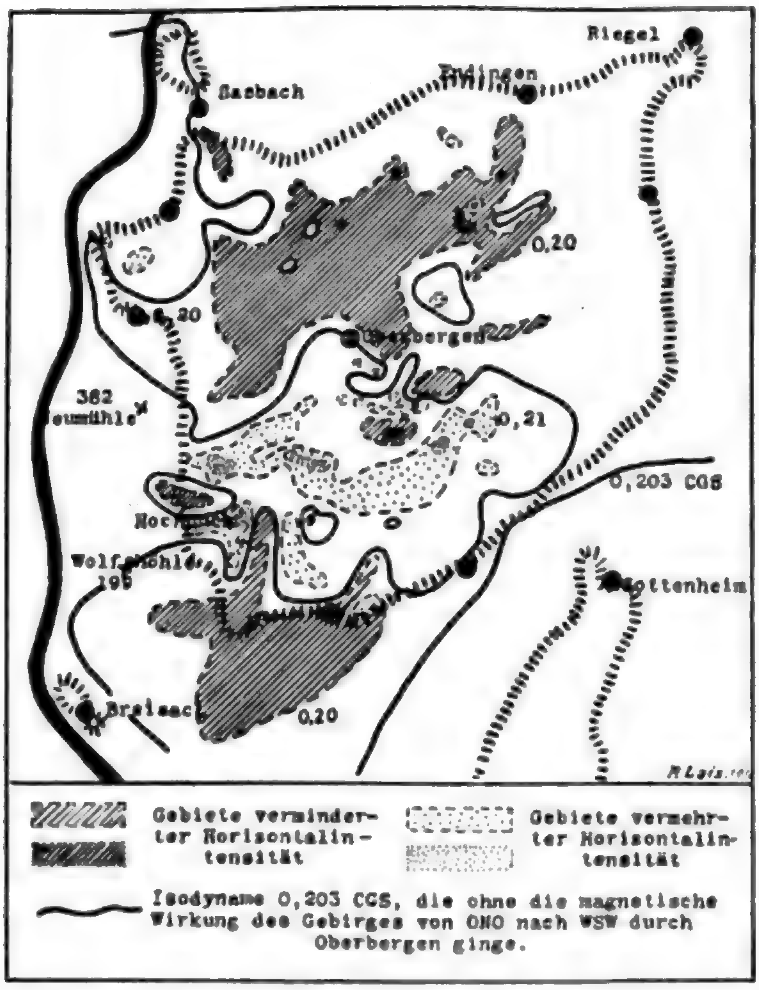


Fig. 18. Die Horizontalintensität des Erdmagnetismus im Kaiserstuhl. Nach G. Meyer.

Ebenso zahlreich wie die Arten der Dislokationen selbst müssen auch diejenigen der Dislokationsbeben sein. Zunächst können wir theoretisch Faltungs- oder Stauungsbeben von Zerrungs- oder Senkungsbeben trennen, obgleich sie praktisch, d. h. in ihren Wirkungen, keinerlei Unterschiede erkennen lassen. Ferner kann es sich in den Außenzonen der Faltengebirge um Quer- oder Blattbeben handeln, wenn die Dislokation bezw. die Bebenachse die Streichrichtung des Gebirges mehr oder minder rechtwinkelig schneidet. Zieht sich aber die Verwerfung parallel der geologischen Gebirgsachse hin, dann liegt ein Längs-, Wechsel- oder Vorschubbeben vor. In den Innenzonen der Faltengebirgsbogen, im Zerrungsgebiete der Landstaffeln und im Schollenlande hängen die Erdbeben meistens mit Vertikalverwerfungen zusammen. Sie hat Sueß als Senkungsbeben bezeichnet, und diese Bezeichnung mag auch beibehalten werden, weil nach unserer Anschauung die Senkung immerhin der häufigere, wenn auch sicherlich nicht alleinige Vorgang ist. Je nach der Art der Verwerfung kann man unterscheiden zwischen peripherischen, zentralen, radialen und tafelförmigen Senkungsbeben. Da übrigens auf den Dislokationslinien und mit den Erderschütterungen die meisten vulkanischen Ausbrüche hervortreten, so machte sich früher gerade hier die Schwierigkeit der Trennung zwischen vulkanischen und tektonischen Erdbeben ganz besonders geltend.

11d) Kryptovulkanische Beben. Es soll übrigens nicht verschwiegen bleiben, daß manche Seismologen, darunter Verfasser, der Ansicht sind, neben den rein tektonischen Beben könnten auch kryptovulkanische Beben auftreten, d. h. solche, bei denen durch noch ungeklärte Vor-

Digitized by Google

gänge (z. B. Kristallisationsprozesse) Energie ausgelöst würde, die erst den Anstoß zu Schollenbewegungen größeren oder geringeren Umfanges gäben.

11e) Nachbeben und Schwarmbeben. Die schon früher (S. 689) charakterisierten Nachbeben entstehen infolge der elastischen Nachwirkung in den von der Spannung befreiten Gesteinsschollen. Experimentelle Versuche haben nämlich gezeigt, daß ein Gesteinsstück unter der konstanten Einwirkung einer Kraft elastisch deformiert wird, daß aber nach dem plötzlichen Erlöschen dieser Kraft die Spannung nicht ebenso plötzlich nachläßt, sondern daß sich der normale Zustand nur ganz allmählich wiederherstellt. In vollem Einklang damit steht, daß die Kurve des Abklingens ihrer Stärke und Häufigkeit, wie Omori zeigen konnte, eine Hyperbel ist. Auch spielt, nach demselben Autor, das geologische Alter des Gesteins eine Rolle; denn es erweist sich in Karten, wo die Orte mit gleicher Zahl von Nachbeben durch Kurven vereinigt werden, der Abstand zwischen zwei aufeinander folgenden Linien der Isofrequenz am größten in archäischem Gestein, während er folgeweise kleiner wird in paläozoischem, mesozoischem und känozoischem Gestein.

Nicht mit den Nachbeben zu verwechseln sind die auch schon erwähnten Schwarmbeben, die sich gleichfalls auf Wochen und Monate erstrecken können, aber aus einer sprungweisen Aneinanderreihung verschieden starker Erdbeben bestehen. Hier haben wir es nach Ansicht des Verfassers mit einem ganzen, in seinem Gleichgewicht gestörten Schollensystem zu tun, bei dem die in eine neue Gleichgewichtslage hineinschwingenden Schollen einander immer wieder stören. Der Umstand aber, daß sich gewöhnlich gewisse Regelmäßigkeiten in der Gruppierung um auffallende Stöße herum nicht verkennen lassen, deutet darauf hin, daß manche Einzelstöße des Schwarmbebens wiederum Nachstöße im Gefolge haben.

11f) Relaisbeben. Da sich bei einem Erdbeben die Bewegung von Scholle zu Scholle fortpflanzt, die Beweglichkeit der einzelnen Schollen aber eine sehr verschiedene ist, so wird es begreiflich, daß unter Umständen auch in mehr oder minder entfernten Gebieten, die vom Schüttergebiet durch eine bebenfreie Zone getrennt sind, durch die dort eintreffenden Wellen reife Spannungen ausgelöst werden. Die so hervorgerufenen Relaisbeben können sowohl Dislokationsbeben, als auch Einsturzbeben sein.

11g) Extratellurische Auslösung von Beben. Es ist ein ebenso alter wie weitverbreiteter Glaube, die wechselnde Stellung der wichtigeren Gestirne (Sonne, Mond, Planeten) beeinflusse durch ihre Attraktionswirkungen die Bebentätigkeit. Bisher konnte ein vollgültiger Beweis weder für noch gegen erbracht werden. Ueberhaupt hat die von manchen mit Vorliebe betriebene Ableitung von seismischen Perioden solange keinen Sinn, als man nicht sicher sein kann, daß auch wirklich sämtliche auftretende Beben bekannt werden; von diesem Ziele sind wir aber, wenn wir von ganz vereinzelten Ausnahmen absehen, zurzeit noch himmelweit entfernt. Die heute nur möglichen „Stichproben" dürfen keinerlei Beweiskraft beanspruchen.

Daß schnelle und starke Luftdruckschwankungen, wie sie der Vorbeizug tiefer barometrischer Depressionen am Epizentrum mit sich bringt, unter Umständen reife tektonische Spannungen und damit Erderschütterungen auslösen können, erscheint recht plausibel. Aber es dürfte schwer fallen, in einem bestimmten Falle den Beweis hierfür zu erbringen.

Namentlich die Beobachtungen an der seismisch so regen Westküste Südamerikas haben in manchen Seismologen (v. Richthofen, Milne, Montessus, Wiechert) die Anschauung erweckt, der Massentransport von einer Scholle auf den Rand der benachbarten infolge der Denudation sei in der Lage, Erdbeben hervorzurufen. Und diese Anschauung erscheint recht einleuchtend, wenn man bedenkt, daß gerade dort die Niveauunterschiede zu beiden Seiten der durch tiefe ozeanische Gräben gekennzeichneten Bruchlinie auf volle 14 km anwachsen. Die Schollen des Hochgebirges, wo die Denutation ganz besonders kräftig wirkt, müssen infolge der Druckerleichterung allmählich in die Höhe steigen, während die Gebiete, in denen die Sedimentierung erfolgt, unter der stets zunehmenden Belastung zur Tiefe sinken.

11h) Seebeben. Daß bei den Seebeben sowohl tektonische, als auch vulkanische Ursachen in Frage kommen, muß man ohne weiteres annehmen. Aber in einem bestimmten Falle die Entscheidung zu treffen, ist mitunter recht schwierig, wenn nicht unmöglich.

Wie sich bei einem submarinen Vulkanausbruch, namentlich in der Tiefsee, die Verhältnisse gestalten, wissen wir nicht. Das plötzliche Hervorstoßen der Lavamassen und die damit verbundenen Dampfexplosionen erschüttern die Wassermassen erheblich, den Meeresboden aber höchstens in seinen alleroberstén Teilen. Die engbegrenzte Stoßwirkung erklärt das Aufsteigen der turmhohen, garbenförmigen Wassersäulen über die Wasseroberfläche.

Die tektonischen Seebeben dürften weniger auf Faltungsvorgänge (solche kommen allerdings vielleicht für die Atlantische

Digitized by Google

Schwelle in Betracht), als auf Spaltenverwerfungen zurückzuführen sein. Wird der Meeresboden von einem Dislokationsbeben betroffen, so treten die Erdbebenwellen in das Wasser über und machen sich, sobald sie auf ein Schiff treffen, als plötzlicher Stoß bemerkbar. An der Oberfläche des Meeres können wegen ihrer mehrere hundert Kilometer betragenden Länge Rayleighwellen keinerlei unmittelbar sichtbare Oberflächenwellen hervorrufen; nur die senkrecht zur Meeresoberfläche gerichteten Stöße vermögen unter Umständen den Widerstand der Atmosphäre zu überwinden, zerreißen alsdann die Oberflächenschicht des Wassers und werfen kleine Strahlen auf, die den Eindruck des Aufwallens erwecken, als koche und siede das Wasser.

Hinsichtlich der seismischen Flutwellen muß man annehmen, daß das Epizentrum des Bebens nicht auf dem Lande, sondern am Meeresgrunde lag, daß es sich also um ein Seebeben handelt, das auch auf dem Festlande verspürt wurde.

Literatur. **Dutton**, *Earthquakes in the Light of the new Seismology. New York 1904.* — **Ehlert**, *Zusammenstellung, Erläuterung und kritische Beurteilung der wichtigsten Seismometer mit besonderer Berücksichtigung ihrer praktischen Verwendbarkeit. In den Beiträgen zur Geophysik, Leipzig 1898.* — **Galitzin**, *Zur Methodik der seismometrischen Beobachtungen. St. Petersburg 1903.* — **Derselbe**, *Ueber die Bestimmung der Konstanten von stark gedämpften Horizontalpendeln. St. Petersburg 1908.* — *Hilfstabellen zur Auswertung von Seismogrammen bei Anwendung aperiodischer Instrumente. St. Petersburg 1908.* — **Hobbs**, *Earthquakes, an Introduction to seismic Geology. New York 1907. Deutsch von Ruska. Leipzig 1910.* — **Hoernes**, *Erdbebenkunde, die Erscheinungen und Ursachen der Erdbeben, die Methoden ihrer Beobachtung. Leipzig 1893.* — **Mainka**, *Kurze Uebersicht der modernen Erdbebeninstrumente. In: Der Mechaniker. Berlin 1907.* — **Milne**, *Seismology. London 1898.* — **Montessus de Ballore**, *Les tremblements de terre, géographie séismologique. Paris 1906.* — **Derselbe**, *La science séismologique, les tremblements de terre. Paris 1907.* — **Sieberg**, *Handbuch der Erdbebenkunde. Braunschweig 1904.* — **Derselbe**, *Der Erdball, seine Entwickelung und seine Kräfte. Eßlingen 1908.* — **Derselbe**, *Methoden der Erdbebenforschung. In Keilhacks Lehrbuch der praktischen Geologie. Stuttgart 1908.* — **Wiechert**, *Theorie der automatischen Seismographen. Berlin 1903.* — *Periodische Erscheinungen. Bollettino della Società sismologica Italiana. Rom.* — *Bulletin de la Commission Séismique Permanente. St. Petersburg.* — *Bulletin und Publications in foreign Languages of the Earthquake Investigation Committee. Tokio.* — *Erdbebenwarte. Laibach.* — *Gerlands Beiträge zur Geophysik. Leipzig.* — *Mitteilungen der Erdbebenkommission der k. k. Akademie der Wissenschaften. Wien.*

A. Sieberg.

Erde.

Chemischer Bestand der Erde.

1. Eruptivgesteine. 2. Sedimente. 3. Mittlere Zusammensetzung der Rinde. 4. Erdkern. 5. Verteilung der Elemente und Mineralien.

1. Eruptivgesteine. Wenn man den chemischen Bestand der Erde untersuchen will, fällt zunächst eine Dreiteilung in die Augen. Wir finden eine Gashülle, eine Wasserhülle und die feste Hülle. Mit Bezug auf die Gashülle sei auf den Artikel „Atmosphäre" verwiesen, mit Bezug auf die Wasserhülle auf den Artikel „Meer". Es verbleibt uns hier nur die Behandlung der festen Erde. Von dieser aber ist natürlich nur ein kleiner Teil, die äußerste Oberfläche, unmittelbar zugänglich. Die tiefsten Bohrlöcher der Erde sind wenig über 2 km tief und der Erdradius beträgt rund 6500 km. Nun liegen ja allerdings die Schichten, welche die Rinde der Erde bilden, meist nicht mehr in ihrer ursprünglichen Lagerung wie die Blätter eines Buches übereinander, sondern sie sind aufgerichtet, so daß man auf der Oberfläche hinschreitend oft mehr als 20 Kilometer in die Erde eindringen kann. Man kann demnach sagen, daß man die Gesteine der Rinde einigermaßen kennt. Sie sind zum Teil Eruptivgesteine, die aus dem feurigen Fluß entstanden sind, zum Teil durch Zerstörung aus den Eruptivgesteinen entstandene Sedimente und zum Teil aus diesen beiderlei Gesteinen entstandene Metamorphe. Gelingt es uns, die durchschnittliche Zusammensetzung der einzelnen Kategorien zu berechnen und gleichzeitig ihr Mengenverhältnis untereinander zu schätzen, so läßt sich über die Pausch-Zusammensetzung der Erdrinde immerhin etwas Genaues aussagen.

Der Amerikaner Clarke hat dies versucht, aber da man nicht in der Lage ist, die einzelnen Gesteine ihrer Menge nach abzuschätzen, so muß man andere indirekte Wege einschlagen. Zunächst wird man eine Entscheidung treffen müssen darüber, bis zu welcher Tiefe man die Rinde in Betracht ziehen will. Clarke hat dafür 10 Meilen, oder rund 16 km genommen. Von dieser Masse können wir mit vollem Recht aussagen, daß sie hauptsächlich aus Eruptivgesteinen besteht; diese aber sind, das lehrt die Erfahrung, ziemlich gleichmäßig über die ganze Erdoberfläche verbreitet, besonders wenn man größere Areale zusammenfaßt. Sind nun von einem solchen größeren Areale mehrere Tausende von Analysen der verschiedenartigen Eruptivgesteine ausgeführt, dann ist klar, daß von selteneren Gesteinen wenige, von häufigeren Gesteinen aber viele Analysen vorhanden sein werden. Man kann die mittlere Zusammensetzung aller Gesteine einfach gleich dem Mittel

Digitized by Google

aller Analysen setzen. So ist Clarke für die Vereinigten Staaten von Nordamerika verfahren und man darf eine Bestätigung der Clarkeschen Resultate darin finden, daß Harker für die britischen Gesteine zu einem nur wenig abweichenden Resultat gekommen ist und etwas Analoges Washington für ein kleineres amerikanisches Gebiet festgestellt hat.

Nach Clarke ergibt sich nun folgende mittlere elementare Zusammensetzung für die Eruptiven:

	%		%
O	47,05	C	0,13
Si	28,26	P	0,11
Al	7,98	S	0,11
Fe	4,47	Cl	0,06
Mg	2,34	F	0,10
Ca	3,43	Ba	0,097
Na	2,54	Sr	0,033
K	2,50	Mn	0,077
H	0,16	Ni	0,023
Ti	0,45	Cr	0,033
Zr	0,025	V	0,018
		Li	0,004

2. Sedimente. In ähnlicher Weise hat derselbe Forscher auch die Zusammensetzung der Sedimente ermittelt, indem er eine Dreiteilung derselben herbeiführte. Er teilt in tonige Sedimente (I), Sandsteine (II) und Kalksteine (III), eine Teilung, welche unbeschadet der geringen Menge anderer Gesteine in der Tat zutreffen kann. Für diese 3 Gruppen wurde folgende durchschnittliche Zusammensetzung gefunden:

	I	II	III
	%	%	%
SiO_2	58,38	78,66	5,19
Al_2O_3	15,47	4,78	0,81
Fe_2O_3	4,03	1,08	} 0,54
FeO	2,46	0,30	
MgO	2,45	1,17	7,90
CaO	3,12	5,52	42,61
Na_2O	1,31	0,45	0,05
K_2O	3,25	1,32	0,33
H_2O	5,02	1,64	0,77
TiO_2	0,65	0,25	0,06
CO_2	2,64	5,04	41,58
P_2O_5	0,17	0,08	0,04
S	—	—	0,09
SO_3	0,65	0,07	0,05
Cl	—	Spur	0,02
BaO	0,05	0,05	—
MnO	Spur	Spur	0,05
Li_2O	Spur	Spur	Spur
C	0,81	—	—

Es galt nun die Mengenverhältnisse dieser Gesteine festzustellen und Clarke kam, nach eingehender Würdigung aller Umstände zu der Annahme, daß man bei gleicher Verteilung der Sedimente rund um die ganze Erde ihre Mächtigkeit zu höchstens 800 m annehmen dürfe. Daraus läßt sich dann berechnen, daß ihre Masse nur etwa 5% von der gesamten Gesteinsmasse bis zu 16 km Tiefe beträgt. Durch einen Vergleich des Mineralbestandes in den Sedimenten und Eruptiven gewinnt man die Ueberzeugung, daß von jenen 5% 4% auf die Tongesteine, 0,75% auf die Sandsteine und nur 0,25% auf die Kalksteine entfallen. Man erhält so folgende mittlere Zusammensetzung der Sedimente:

	%		%
SiO_2	58,76	Na_2O	1,12
Al_2O_3	13,13	K_2O	4,60
Fe_2O_3	3,41	H_2O	4,30
FeO	2,01	CO_2	4,80
MgO	2,53		
CaO	5,45	usw.	

3. Mittlere Zusammensetzung der Rinde. Berücksichtigt man diese Resultate und gleichzeitig die chemische Zusammensetzung des Meerwassers, sowie der Luft, so erhält man als Mittel der chemischen Zusammensetzung für die ganze Erdrinde bis zu 16 km Tiefe, das unter I angeführte Resultat:

	I	II	III	IV
	%	%	%	%
O	49,85	47,17	85,79	23,01
Si	26,03	28,00	—	—
Al	7,28	7,84	—	—
Fe	4,12	4,44	—	—
Ca	3,18	3,42	0,05	—
Mg	2,11	2,27	0,14	—
Na	2,33	2,43	1,14	—
K	2,33	2,49	0,04	—
H	0,97	0,23	10,67	—
Ti	0,41	0,44	—	—
C	0,19	0,19	0,002	0,01
Cl	0,20	0,06	2,07	—
Br	—	—	0,08	—
P	0,10	0,11	—	—
S	0,10	0,11	0,09	—
Ba	0,09	0,09	—	—
Mn	0,08	0,08	—	—
Sr	0,03	0,03	—	—
N	0,03	—	—	75,68
Argon	—	—	—	1,3
F	0,10	0,10	—	—
Uebr. Elem.	0,47	0,50	—	—

Unter II ist die Zusammensetzung der Lithosphäre, unter III die der Hydrosphäre und unter IV die der Atmosphäre beigefügt. II beträgt 93,39%, III 6,58% und IV 0,03% der ganzen Masse. Diesen Zahlen von Clarke hat nun J. H. L. Vogt noch folgende beigefügt:

	%		%
Cr	0,01	Zn, Pb	0,000 x
Ni	0,005	Cu	0,0000 x—0,000 x
Li	0,005	Ag	0,00000 x
Sn	0,000 x—0,00 x	Au	0,000000 x
Co	0,0005	Cd	0,00000 x
J	0,0001	Jn, Ga	0,0000000 x
Rb	0,0001	B, Be	0,00 x
		Ce, Yt	0,00 x—0,000 x
		Th	0,000 x
		Se	0,000000 x—0,00000 x

Digitized by Google

Vogt verdanken wir auch eine Kritik der Clarkeschen Resultate und er gibt für dessen Zahlen folgende Genauigkeitsgrenzen:

Sauerstoff	± 1/20
Silicium	± 1/15
Aluminium und Chlor	± 1/4
Eisen, Calcium, Magnesium, Natrium, Kalium	± 1/3
Wasserstoff	± 1/5
Titan, Phosphor, Mangan, Schwefel	± 1/2

Diese Abweichungen ändern natürlich an der Größenordnung der Clarkeschen Zahlen so gut wie nichts. An dieser Stelle mag auch darauf hingewiesen werden, daß Bunsen seinerzeit die mittlere Zusammensetzung der Granite auch als die mittlere Zusammensetzung der Erdrinde bezeichnet hat und daß diese Zahlen tatsächlich im großen und ganzen mit denen von Clarke übereinstimmen.

4. Erdkern. Dies ist jedoch nur die chemische Zusammensetzung der Erdrinde, welcher Clarke ein spezifisches Gewicht von 2,7 zuschreibt; die ganze Erde hat aber ein spezifisches Gewicht von 5,57 und daraus folgt, daß sich die chemische Zusammensetzung nach dem Erdinnern hin ändern muß. Man hat daher angenommen (vgl. den Artikel „Erdinneres"), daß im Innern der Erde ein metallischer Nickeleisenkern mit einem Radius von 5000 km vorhanden sei, der dann erst von einer 1500 km dicken Silikatschale umschlossen wäre. Natürlich ist ein allmählicher Uebergang von den leichten Silikaten der Erdoberfläche zu den schwereren der größeren Tiefe und von da zum metallischen Kern vorhanden.

Für diese Meinung spricht auch die chemische Zusammensetzung der Meteoriten, in denen das gediegene Nickeleisen besonders reichlich ist und in Verbindung mit wesentlich nur Magnesium- und Eisensilikaten steht (vgl. den Artikel „Meteoriten").

Auch die Erfahrungen der Petrographie machen es wahrscheinlich, daß bei der Abkühlung der Erde aus dem Schmelzflusse sich einerseits gediegenes Nickeleisen abgeschieden und im Erdkern gesammelt hat und daß andererseits darüber sich eine Zone befinden muß, deren Zusammensetzung wesentlich den zuerst sich ausscheidenden Mineralien entspricht. Diese aber sind femischer Natur, d. h. sie enthalten vorzugsweise Magnesium und Eisen.

Berücksichtigen wir nun diese Betrachtungen, dann wären die auf und in der Erde befindlichen wichtigen Elemente der Menge nach in folgende Reihe zu ordnen:

Eisen, Sauerstoff, Silicium, Magnesium Aluminium, Calcium, Natrium, Kalium.

Aus den obigen Zusammenstellungen erhellt, daß nur 8 Elemente in erheblicher Menge an dem Aufbau der Erde beteiligt sind. Diese Elemente haben sämtlich ein Atomgewicht, das zwischen 16 und 56 liegt; alle leichteren und alle schwereren Elemente treten stark zurück.

5. Verteilung der Elemente und Mineralien. Von den vorhandenen Elementen gehören fünf (K, Na, Ca, Al, Si) hauptsächlich der Schale, drei (Mg, Fe, Si) der Uebergangszone und eines (Fe) dem Kern an. Diese Erscheinung hat ihren Grund in Saigerungen nach dem spezifischen Gewicht der entstehenden Mineralien. Das Mengenverhältnis der Mineralien in den Eruptiven der Erdoberfläche, ist nach Clarke etwa folgendes:

	%
Feldspäte und Vertreter	59,5
Hornblenden und Augite	16,8
Quarz	12,0
Glimmer	3,8
Uebrige Mineralien	7,9

Endlich mag hier noch darauf hingewiesen werden, daß der Erde als ganzem ein durchaus reduzierender Charakter zukommt, wie dies ja auch bei den vulkanischen Emanationen, bei den von den Vulkanen ausgeworfenen schneeweißen Aschen nachgewiesen und bei den stark eisenoxydulhaltigen Laven selbstverständlich ist. Auch den Meteoriten kommt dieser reduzierende Charakter zu.

Literatur. *F. W. Clarke, The Data of Geochemistry, II. Aufl. Washington 1911.* — *J. H. L. Vogt, Ueber die relative Verbreitung der Elemente. Ztschr. f. prakt. Geologie 1898. 225, 314, 377, 413.*

G. Linck.

Erden.

Als Erden, eigentliche Erden, werden die Oxyde der Erdmetalle (vgl. „Erdmetalle") bezeichnet, als „alkalische Erden" die Oxyde der Erdalkalimetalle (vgl. „Erdalkalimetalle").

Erden.

Mineralien mit seltenen Erden.

I. Allgemeiner Teil. 1. Die als Metalle der seltenen Erden bezeichneten Elemente. 2. Entstehungsart und Vorkommen der Mineralien mit seltenen Erden. 3. Ihre technische und wissenschaftliche Verwendbarkeit und Bedeutung. II. Spezieller Teil. Beschreibung der einzelnen Mineralien.

I. Allgemeiner Teil.

1. Die als Metalle der seltenen Erden bezeichneten Elemente. Mit der Bezeichnung „Metalle der seltenen Erden" faßt man heute eine große Anzahl von Elementen zusammen. Man rechnet zu ihnen das Zirkonium, das Thorium, die Gruppe des

Digitized by Google

Ytterbiums und die Gruppe des Cers. Zur Gruppe des Cers gehören außer diesem selbst die Elemente Lanthan, Praseodym, Neodym und Samarium. Zur Gruppe des Ytterbiums zählt man das Europium, Gadolinium, Terbium, Dysprosium, Holmium, Erbium, Thulium, Yttrium, Ytterbium, Scandium. Diese Aufzählung der Metalle der Ytterit- und Ceriterden ist aber sicherlich noch nicht vollständig, es gehören zu ihnen noch viel mehr Elemente; doch sind diese vorläufig nicht isoliert und in ihren Eigenschaften genügend bestimmt. Unsere Kenntnisse sind hier eben noch lückenhaft und zwar deswegen, weil diese Erden in allen ihren Eigenschaften außerordentlich nahe miteinander verwandt sind, und es große Schwierigkeiten macht, sie von einander zu trennen. Aus dem gleichen Grunde kommen sie auch in der Natur immer zusammen vor. In einem Mineral, das eine Ytteriterde enthält, lassen sich auch alle anderen in größerer oder geringerer Menge nachweisen und das gleiche gilt für die Ceriterden.

Die hier zu besprechenden Mineralien können wir daher chemisch zunächst einmal in 4 Gruppen einteilen; und zwar in

1. die Mineralien des Zirkoniums,
2. des Thoriums,
3. der Ytterit- und
4. der Ceriterden.

2. Entstehungsart und Vorkommen der Mineralien mit seltenen Erden. Die wichtigsten Vertreter der beiden ersten Gruppen sind Sauerstoffverbindungen wie der Zirkon, die der beiden letztgenannten Phosphate wie Monazit, Xenotim usw. Da aber Zirkonium, Thorium und die anderen seltenen Erden auch wiederum untereinander große Aehnlichkeit aufweisen, sind Mineralien, die alle 4 Elemente oder Elementgruppen zusammen enthalten, außerordentlich zahlreich. Infolgedessen sind ferner alle diese Mineralien auf die gleiche Weise entstanden. Soweit es sich um primäre Mineralien handelt, finden sie sich ausschließlich in Eruptivgesteinen, Graniten, Pegmatiten usw. Früher waren die Hauptfundstellen Schweden, Norwegen und das Ilmengebirge im Ural. Heute sind die nichteuropäischen Fundorte viel ertragreicher, nämlich erstens die Vereinigten Staaten, und zwar von diesen Nord- und Südcarolina, Virginia, Idaho, Colorado und Texas, und zweitens Brasilien. Aber auch in allen anderen Teilen der Erde treffen wir die seltenen Erden an. Sie sind, wenn auch meist nur in geringer Menge, außerordentlich weit verbreitet. Das hat sich besonders in den letzten Jahren, seitdem man diesen Mineralien ein erhöhtes Interesse zugewandt hat, immer wieder gezeigt. Früher schienen sie nur selten, weil man nicht nach ihnen gesucht hatte. Heute ist das anders geworden; sowohl in der Technik, wie in der Wissenschaft spielen die seltenen Erden eine große Rolle.

3. Die technische und wissenschaftliche Verwendbarkeit und Bedeutung der Mineralien mit seltenen Erden. Die Mineralien mit seltenen Erden werden in großem Maße verwendet zur Herstellung der Glühstrümpfe des Gasglühlichts, der Nernstlampen usw. Außerdem sind sie auch außerordentlich wichtig als Ausgangsmaterial zur Gewinnung der Radioelemente. So hat z. B. O. Hahn aus dem Thorianit zum ersten Male das sehr aktive Radiothorium abgeschieden.

In der folgenden Einzelbeschreibung sind die Mineralien nach dem System von Groth geordnet.

II. Spezieller Teil.

a) Sauerstoffverbindungen. Das Zirkonoxyd kommt als Mineral sehr selten vor; es kristallisiert monoklin, hat die Härte 6,5, das spezifische Gewicht 5 und trägt den Namen Baddeleyit.

Sehr viel wichtiger ist dagegen der Zirkon. Er kristallisiert tetragonal und ist isomorph mit Zinnstein, Rutil, Thorit und Polianit. Die Kristalle sind meist säulenförmig oder pyramidal ausgebildet. Die Basis tritt sehr selten auf. Das Mineral spaltet nach (111) und (110), zeigt einen muscheligen Bruch, hat die Härte 7½ und besitzt lebhaften Glasglanz. Seine Farbe ist nicht sehr charakteristisch; meist ist sie braunrot, seltener gelb oder grün. Die Lichtbrechung des Zirkons ist stark und ebenso die Doppelbrechung. Seine chemische Zusammensetzung wird durch die Formel $ZrSiO_4$ ausgedrückt. Der Zirkon ist weit verbreitet in Graniten, Quarzporphyren, in kristallinen Schiefern und endlich auch in Sandsteinen. Ist er durchsichtig und gelblichrot gefärbt, so wird er unter dem Namen Hyazint als Edelstein geschätzt. Vor allen Dingen aber verwendet man ihn zur Gewinnung von Zirkonoxyd für die Nernstlampen. Dem verwitterten Zirkon hat man öfters neue Namen gegeben, wie: Malakon, Cyrtolit, Tachyaphaltit, Ostranit, Oerstedit und Auerbachit.

Kristallographisch dem Zirkon sehr ähnlich ist der Naegit. Er enthält aber außer Zr auch Th und Ytterbium. Seine nähere Untersuchung steht noch aus.

Das thoriumreichste Mineral ist der Thorianit; er enthält bis zu 79% ThO_2; daneben UO_2 und Ceriterden.

Die dem Zirkon analog zusammengesetzte Th-Verbindung, $ThSiO_4$, heißt als schwarzes Mineral Thorit, als gelbes Orangit. Diese letzte Varietät ist außerdem schwerer als die erste, was daher kommt, daß $ThSiO_4$ nie rein in der Natur vorkommt, sondern erstens immer wasserhaltig ist und zweitens Beimengungen von Uran, Mangan, Cer, Zinn und Blei in wechselnder Menge enthält. Im übrigen sind die physikalischen Eigenschaften des Thorit-Orangit denen des Zirkon sehr ähnlich. Kristallsystem ebenfalls tetragonal. Auch die Art des

Digitized by Google

Vorkommens ist die gleiche. Nur ist eben der Zirkon viel häufiger. Auch vom Thorit gibt es eine ganze Reihe meist amorpher Umwandlungsprodukte, wie Auerlith, Uranothorit, Calciothorit, Eukrasit und Freyalith.

b) Haloide. Von Haloiden der seltenen Erden kommen in der Natur nur Fluorverbindungen vor. Schon ziemlich lange bekannt ist der Tysonit (Ce,La,Di)F_3, der hexagonal kristallisiert. Ferner ist zu nennen der Yttrocerit, der bis zu 20% Fluorverbindungen von Cerit- und Ytteriterden, ferner Fluorcalcium und Wasser enthält. Hierher gehören ferner der Fluocerit $(CeLaDi)_2OF_4$, Kristallsystem hexagonal, ebenso dessen wasserhaltiges Verwitterungsprodukt, der Hydrofluocerit; ferner der Bastnäsit $(CeLa)_2F_6+(CeLa)_2O_3+CO_2$ mit etwas Di, außerdem der Parisit $CaF_2+Ce_2O_3+3CO_2$ und der Kischtimit, der jedenfalls nur ein zersetzter Parisit ist. Es gibt auch noch einen bariumhaltigen Parisit, der den Namen Cordylit trägt; und ein an Ca reiches Cermineral, Synchisit, $CeFCa(CO_3)_2$. Zu dieser Reihe ist neuerdings der an Ytterden reiche Yttrofluorit hinzugekommen.

c) Karbonate. Schon Bastnäsit und Parisit enthalten neben Fluor auch Kohlensäure, so daß man sie auch zu den Carbonaten zählt. Zu diesen gehören aber vor allem der Weibyeit, der nach der Analyse von Brögger aus 67% Ceriterden und aus CO_2, Ca, Sr, Fe besteht, Kristallsystem rhombisch; ferner der Ancylit, ein basisches Cer- und Sr-Carbonat, und endlich der Lanthanit, ein wasserhaltiges La-Carbonat von der Zusammensetzung $La_2(CO_3)_3+9H_2O$. — Diese drei Mineralien sind aber außerordentlich selten. Sie kommen immer zusammen mit den oben erwähnten Fluorverbindungen vor, aus denen sie durch Zersetzung entstanden sind.

d) Uranate. Unter den Uranaten ist für uns das zu: Radiumgewinnung so sehr gesuchte Uranpecherz das wichtigste (vgl. auch den Artikel „Radioaktive Mineralien"). Zwar gibt man gewöhnlich an, der Uraninit, wie man das Uranpecherz nennt, sei einfach Uranoxyd, (U_3O_8). Es enthält aber meistens mehr oder weniger große Mengen von seltenen Erden, speziell von Thorium, Cer und Ytterbium. Kristallsystem regulär. Nichts anderes als Pecherz mit Beimengungen von Y, Er, Ce und Th ist auch der regulär kristallisierende, in Oktaedern vorkommende Cleveit und Nivenit. Bröggerit enthält außer Uran eigentlich nur noch Thoriumoxyd.

e) Phosphate. Zu dieser Rubrik gehören, wie schon erwähnt, die häufigsten und bekanntesten unter den Cerit- und Ytteriterden. Der Xenotim oder Ytterspat ist Yttriumorthophosphat von der Formel YPO_4; doch enthält er auch Er, Ce und N. Seine kleinen Kristalle sind tetragonal und dem Zirkon, mit dem sie häufig zusammen vorkommen, recht ähnlich. Der Xenotim scheint aus einem Hussakit genannten Sulphatophosphat entstanden zu sein, aus dem die Schwefelsäure bis auf Reste ausgelaugt wurde. Auch ein dem Xenotim nahe verwandtes Yttriumniobattantalat kommt in der Natur vor, der Fergusonit $Y(NbTa)O_4$, und zwar meist mit einem geringen Gehalt an Ce, Ur, Th, Zr und He. Kristallsystem tetragonal. Der Sipylit ist wesentlich niobsaures Er und wahrscheinlich isomorph mit dem Fergusonit. Doch all diese Mineralien sind von geringer Bedeutung gegenüber dem Monazit, dem Cer-Lanthan-phosphat, das nach der Formel $(CeLa)PO_4$ zusammengesetzt ist und wechselnde Mengen von Thorium führt. Es ist heute das weitaus wichtigste Material zur Gewinnung der Ceriterden und des Thoriums. Er kristallisiert monoklin, hat einen muscheligen Bruch, Fettglanz, die Härte 5 und eine meist rotbraune Farbe. Außer in Eruptivgesteinen trifft man ihn vor allen Dingen auf sekundärer Lagerstätte, im Schwemmsand der Flüsse. Besonders wichtig sind da die brasilianischen Ablagerungen in den Sandbänken an der Seeküste der Provinz Bahia. Aber auch Nord- und Südcarolina liefern große Mengen Monazit. Der schon früh entdeckte Mikrolit ist eigentlich ein Kalkniobat; doch ist das Calcium bei ihm häufig durch seltene Erden ersetzt. Kristallsystem regulär. Auch Koppit ($Ca_2Nb_2O_7$) ist meist reich an seltenen Erden und der Yttrotantalit ist praktisch reines $Y_4(Ta_2O_7)_3$. Ihm ähnlich ist Hjelmit, für den man noch keine bestimmte Formel angeben kann. Er enthält Y und Ce. Chemisch ist ihm Samarskit sehr ähnlich, der ebenfalls ein Y- und Er-haltiges Niobat ist. Kristallsystem rhombisch. Zwischen ihm und dem erwähnten Yttrotantalit steht der Plumboniobit, wie der Name sagt, ein Bleiniobat, das ebenfalls Y enthält. Dem Samarskit stehen der Nohlit und der Annerödit, dessen Zersetzungsprodukt der Rogersit ist, sehr nahe. In diese Gruppe gehört ferner der Risörit, dessen Hauptbestandteile Yttrium und Niob sind. Endlich ist noch zu erwähnen, daß Columbit, Niobit und Tantalit manchmal geringe Mengen seltener Erden enthalten.

f) Wasserhaltige Phosphate. Gegenüber den wasserfreien sind die wasserhaltigen Phosphate von ganz untergeordneter Bedeutung. Früher hat man nur Rhabdophan und Scovillit gekannt, deren Zusammensetzung etwa durch die Formel $(La,Di,Y,Er)_2O_3P_2O_5+H_2O$ gekennzeichnet wird. In neuerer Zeit ist da hinzugekommen: der Florenzit, ein Al-Ce-Phosphat, das mit $6H_2O$ kristallisiert, der trikline Anapait von der Formel $Ca_2Fe(PO_4)_2+4H_2O$ und der Gorceixit mit Spuren von Ce. Den Erikit könnte man auch zur nächsten Gruppe rechnen, denn er enthält neben Phosphor auch Kieselsäure und an seltenen Erden Ce, Di und La.

g) Basische Silikate. Zu dieser Gruppe gehören zunächst die sehr seltenen Mineralien: Cappelenit, Britholit, Melanocerit, Karyocerit und Tritonit. In enger Beziehung zu ihnen scheint auch der Steenstrupin zu stehen. Sie weisen alle einen Gehalt an Bor oder Fluor und an seltenen Erden auf und finden sich in den Augitsyeniten des südlichen Norwegens. Viel häufiger ist der Gadolinit, der mit dem Datolit isomorph ist, also auch monoklin kristallisiert. Seine Formel ist $FeBe_2Y_2Si_2O_{10}$. Er ist meist pechschwarz, kommt in Norwegen und außerdem in Schreiberhau im Riesengebirge und im Radautal im Harz vor. Ein Zersetzungsprodukt von ihm ist wahrscheinlich der Yttrialit.

Digitized by Google

Mit dem Gadolinit ist der ebenfalls Ce-haltige Homilit isomorph. Ferner ist hier noch zu nennen der Erdmannit, dessen Eigenschaften aber vorläufig noch nicht genügend bestimmt sind und der vielleicht ein Verwitterungsprodukt des Homilit ist. Ein Mineral von sehr komplizierter und dabei auch schwankender Zusammensetzung ist der Orthit. Er gehört zur Gruppe des Epidot und ist ein wasserhaltiges Cer-Calcium-Aluminiumsilikat mit geringen Mengen von Di, La und Y. Er kristallisiert monoklin, ist pechschwarz, hat die Härte 5,5 und zeigt Fettglanz. Der Orthit, der auch als Allanit bezeichnet wird, ist außerordentlich weit verbreitet. Als akzessorischen Gemengteil findet man ihn in Graniten, Syeniten, Dioriten und recht häufig auch im Tonalit des Adamello. Auch in den Auswürflingen des Laacher Sees kommt er vor. Ihm nahe verwandt ist der Piemontit oder Mangan-Epidot. Nur enthält er viel geringere Mengen von seltenen Erden, meist nur bis zu etwa 2%. — Recht häufig ist der auch zu den Epidotmineralien gerechnete Cerit oder Cerinstein; er kristallisiert rhombisch, doch sind seine Kristalle selten. Meist findet man ihn in feinkörnigen Aggregaten, graubraun gefärbt; er hat Fettglanz und wird durch Salzsäure zersetzt. Er besteht bis zu 60%, ja manchmal bis zu 70% aus seltenen Erden. Außerdem enthält er Ca, Wasser und Kieselsäure. Er ist eines der Mineralien, in denen man zuerst seltene Erden gefunden hat. Die dem Cerit entsprechende Verbindung, die an Stelle der Cerit- Yttererden enthält, kommt in der Natur nur sehr spärlich vor und wird Kainosit genannt. Außerdem steigt der Gehalt an Yttererden beim Kainosit nur bis zu 35%. Ihm stehen zwei weitere, an Yttererden reiche Mineralien, Rowlandit und Thalenit, nahe.

h) Orthosilikate. Der sogenannte Yttergranat enthält ebenfalls Ytteriterden und Zirkonium. In Deutschland wurde er als Einschluß in einem Granitgange an den Kochelwiesen bei Schreiberhau gefunden.

i) Metasilikate. Von Metasilikaten sind bis jetzt vier Mineralien bekannt, die bis zu 20% Zirkonium, aber auch geringe Mengen von Ceriterden enthalten. Es sind das die monoklinen Mineralien Rosenbuschit, Lavenit und Wöhlerit und der dem triklinen Kristallsystem angehörige Hiortdahlit.

k) Polysilikate. Zu den Polysilikaten gehört zwar eine große Anzahl von Mineralien; doch sind dies keine sonderlich wichtigen. Nichts anderes als Titanitvarietäten sind die Mineralien Yttrotitanit, Eukolit-Titanit, Alshedit. Sie enthalten etwa 2 bis 3% seltene Erden. Nur eben erwähnt werden sollen die 3 Mineralien Mosandrit, Johnstrupit und Rinkit, die man auch am besten zur Titanitgruppe stellt. Kristallsystem monoklin. Sie sind sehr selten und enthalten bis zu 25% Ceriterden. Ihnen ist in jeder Beziehung der Tscheffkinit sehr ähnlich. — Auch der Zirkelit gehört hierher, der zur Hälfte aus Zirkon besteht. Kristallsystem regulär. Ein tonerdehaltiger, aber thor- und eisenfreier Zirkelit ist der Uhligit. Zum Gegensatz von Katapleit und Elpidit, die sehr zirkonerdereich sind, enthält der Leukosphenit nur 3% hiervon. — Ferner zählt zu den Titanaten der Delorenzit. Seine sehr komplizierte Formel weist unter anderen auch Y auf. Im Yttrokrasit, einem wasserhaltigen Titanat, hat man außer Y auch Th nachgewiesen. Erwähnenswert ist ferner Eudialyt, mit einem Gehalt von 10% Zirkon- und 3 bis 5% Ceriterden. Von diesem Mineral findet sich außer großen rötlichen, hexagonalen Kristallen noch eine weniger gut ausgebildete Abart, die eine braune Farbe aufweist und den Namen Enkolit führt.

Zwei Varietäten des Perowskit, nämlich der Knopit und der Dysanalyt, enthalten ebenfalls 5% Ceriterden, während einige weitere Abarten dieses Minerals, nämlich Pyrochlor, Endeiolit, Hatchettolit und der erst seit kurzem bekannte Merignacit einen geringeren Prozentsatz, manchmal nur 2%, an Cergehalt aufweisen.

An dieser Stelle reiht man wohl auch am besten den neu entdeckten Beckelit ein, dessen Zusammensetzung durch die Formel $Ca_3(Y,Ce,La,Di)_4(SiZr)_3O_{15}$ repräsentiert wird. Euxenit, der wieder etwas häufiger auftritt, als die eben erwähnten Mineralien, ist im wesentlichen ein Titanat und Niobat mit Zusätzen von Y, Er und Ce, wozu noch NO_2, FeO und He tritt. Er wurde schon früh in Norwegen entdeckt, kristallisiert rhombisch, doch sind seine Kristalle selten. Ihm ähneln Polykras und Loranskit; und auch Aeschynit unterscheidet sich von ihm wahrscheinlich nur dadurch, daß er an Stelle von Uran Thorium enthält. Der Polymignyt endlich ist bis auf einen 14%-Gehalt an Zirkonerde wiederum mit dem Aeschynit identisch. Ebenso wie die Euxenit-Polykras-Mineralien sind die untereinander isomorphen Blomstrandin und Priorit zusammengesetzt. Jedenfalls stehen sie zu den ersteren im Verhältnis der Dimorphie.

Die neuentdeckten Mineralien Hellandit (monoklin) und Thortveitit (rhombisch) sind Polysilikate der Ytteriterden. Damit sind die bis heute bekannten Mineralien der seltenen Erden erschöpft.

Aus dieser Zusammenstellung selbst geht wohl am deutlichsten hervor, wie häufig diese „seltenen“ Erden eigentlich sind, besonders wenn man in Betracht zieht, daß sie auch schon in Mineralien, wie Apatit, Feldspat uws. öfters nachgewiesen worden sind.

Literatur. ***Abeggs*** *Handbuch der Anorganischen Chemie III, 1.* — ***Groth,*** *Tabellarische Uebersicht der Mineralien.* — ***Schilling,*** *Das Vorkommen der seltenen Erden im Mineralreich.* — ***Schwantke,*** *Neue Mineralien, Fortschritte der Mineralogie, Kristallographie und Petrographie. Bd. I und II.*

A. Ritzel.

Erdfälle

meist kreisförmige oder elliptische mehr oder weniger große Vertiefungen der Erdoberfläche, welche durch die Auslaugung unterirdischer löslicher Gesteine (wie Gips oder Steinsalz) und den Einsturz darüber liegender Gesteinsmassen entstanden sind, (vgl. den Artikel „Meteorwasser“).

Digitized by Google

Erdinneres.

1. Stofflicher Bestand. 2. Temperatur des Erdinnern. 3. Zustand des Erdinnern: a) Gasförmig. b) Flüssig. c) fest.

1. Stofflicher Bestand. Der direkten Beobachtung ist nur ein verschwindend kleiner Teil der Erdoberfläche zugänglich. Ueber alle Stoffe jenseits dieser dünnen Kruste müssen wir auf Umwegen einen Aufschluß zu erlangen suchen, wobei uns zunächst die Beobachtungen über die mittlere Erddichte behilflich sein werden. Zur Beobachtung der mittleren Erddichte sind verschiedene Methoden angewandt worden. Bei der ersten von Newton vorgeschlagenen beobachtet man die Ablenkung eines Bleilotes durch einen Berg, dessen Masse und Gestalt bekannt sind. Die zweite Methode benutzt die Beobachtung von Pendelschwingungen am Fuße und auf dem Gipfel eines Berges, oder an der Erdoberfläche und in einem Schacht. Der Nachteil dieser Methoden besteht darin, daß man zur Berechnung die Masse und Dichtigkeit eines Berges oder einer Erdschicht benutzen muß, die trotz aller Sorgfalt nicht genau zu ermitteln sind. Um diese Fehlerquelle zu beseitigen, benutzte Cavendish die sogenannte Drehwage, während die neuesten Beobachtungen fast ausschließlich mit der Wage ausgeführt werden. Als letzte Methode sei die Wilsingsche Pendelmethode erwähnt.

Die von den verschiedenen Forschern erhaltenen Werte sind aus folgender Tabelle ersichtlich.

	Beobachtungsjahr	Mittlere Erddichte	Beobachtungsmethode
Maskelyne und Hutton	1775—1778	{4,48 {4,95	Lotablenkung
James	1856	5,316 ± 0,054	„
Carlini	1824	4,39	Pendel
nach Schmidt		4,837	„
Mendenhall	1881	5,77	„
nach Fresdorf		5,667	„
Airy	1856	6,566 ± 0,0182	„
Haughton	1856	5,48	„
Sterneck	1883	5,77	„
nach Helmert		5,71	„
Cavendish	1798	5,48	Drehwage
Reich	{1838 {1850	5,43 ± 0,0233 5,583	„ „
Baily	1843	5,66	„
berichtigt		5,55	„
Cornu-Baille	1873	5,56	„
Yolly	1880	5,692 ± 0,068	Wage
Poynting	{1878 {1891	5,69 ± 0,15 5,4934	„ „
Richarz, Krigar-Menzel	1896	5,505 ± 0,009	„
Wilsing	{1887 {1889	5,594 ± 0,032 5,577 ± 0,013	Pendel

Aus den neueren, möglichst fehlerfreien Beobachtungen ergibt sich, daß die mittlere Erddichte zwischen 5,4 und 5,7 liegt. Dieser Wert ist bedeutend höher als die Dichte der die äußere Kruste zusammensetzenden Gesteine. Das spezifische Gewicht der Diorite, die etwa der Zusammensetzung der äußeren Kruste entsprechen, ist etwa 2,8; auch haben die Feldspate, die etwa 59% der eruptiven Erdkruste ausmachen, nur eine Dichte von 2,5 bis 2,8, der Quarz mit 12% eine solche von 2,7 und die Hornblenden und Augite mit 17% eine Dichte von 3,1 bis 3,5. Da die mittlere Dichte der Erde etwa doppelt so groß ist als die mittlere Dichte der äußeren Kruste, so müssen sich in den inneren Partien unserer Erde bedeutend dichtere Massen vorfinden und zwar müssen sie nicht nur dichter sein als die an der Oberfläche, sondern auch dichter als die mittlere Erddichte. Die hohe mittlere Erddichte ist auf zweierlei Art zu erklären versucht worden. Von einer Anzahl von Forschern (Laplace, Lipschütz, Darwin, Callandreau, Helmert, Tumlirz) sind Dichtegesetze aufgestellt worden, die alle von der Voraussetzung ausgehen, daß die Dichte von der Oberfläche stetig bis zum Mittelpunkt zunimmt. Dabei ergibt sich eine zentrale Erddichte von 9,5 bis 11. Vom Standpunkt der Mathematik und Astronomie läßt sich gegen diese Gesetze nichts einwenden. Es läßt sich aber die hohe mittlere Erddichte auch noch auf eine andere Weise erklären, die ebenso wie die angeführten Dichtegesetze

Digitized by Google

mit den Erfahrungen der Astronomie und Mathematik in Einklang zu bringen ist, dafür aber den Vorteil hat, daß sie mit den geologischen Tatsachen, besonders wenn man die Entstehung der Erde berücksichtigt, besser übereinstimmt. Ich halte die Annahme von Dana und Wiechert, daß die Erde aus einem Eisenkern mit einer relativ dünnen Steinkruste bestehe, für besser als die, daß die Dichte von außen nach innen kontinuierlich zunehme, denn für die zweite Hypothese haben wir keinen Beweis, für die erste sprechen aber verschiedene, noch näher zu erörternde Umstände. Wiechert nimmt als mittlere Erddichte 5,58 und als Dichte des Steinmantels 3,2 an und erhält als Dichte des Metallkerns Werte, die nur wenig über 7,8, der Dichte des Eisens liegen. Er schließt daraus, daß der Kern unserer Erde hauptsächlich aus metallischem Eisen bestehe, dessen spezifisches Gewicht infolge des großen Druckes etwas höher sei, als an der Oberfläche. Für einen Eisenkern gerade spreche auch die große Verbreitung des Eisens in den Meteoriten und im Sonnenspektrum. Die Dicke des Steinmantels sei etwa 1400 km ($^1/_5$ Erdradius), jedenfalls sei sie nicht kleiner als 1200 km und nicht größer als 1600 km. Unter diesen Voraussetzungen stimmt die berechnete Erdabplattung mit der beobachteten gut überein. Zwischen Kern und Steinkruste nimmt Wiechert eine dünne, plastische Steinschicht an, und zwar sowohl wegen der Vulkane, als auch weil sich bei Erdbeben die Erschütterungswellen längs der Erdrinde fortpflanzen, was nur bei einer durch eine nachgiebige Schicht von dem festen Kern getrennten Kruste möglich ist. Eine Hauptstütze für Wiecherts Ansicht sind die Resultate der Spektralanalyse und die Erkenntnis, daß die Meteoriten Bruchstücke von anderen Weltkörpern unseres Planetensystems sind. Beide beweisen uns, daß die auf der Erde in größeren Mengen vorhandenen Elemente auch auf den übrigen Weltkörpern in größerer Masse vorhanden sind. Die Meteoriten bestehen in der Hauptsache aus eisenreichen Verbindungen, zum Teil fast ganz aus Nickeleisenlegierungen, während die Steinmeteoriten der Masse nach dagegen sehr zurücktreten. Dieses Verhältnis von Eisen zum Silikat läßt sich leicht erklären, wenn man bedenkt, daß diese Weltkörper nach der Kant-Laplaceschen Theorie aus Gasen entstanden sind, die sich bei fortschreitender Abkühlung zu Dämpfen und Flüssigkeiten kondensiert haben. Mit dieser Kondensation ging eine Sonderung nach dem spezifischen Gewicht Hand in Hand. Zu oberst schwammen die eisenarmen Silikate, darunter folgte eine ziemlich dünne mit Eisen gesättigte Silikatschicht; und den Kern bildete gediegenes Eisen, was von den Silikaten nicht mehr aufgenommen werden konnte. In gleicher Weise müssen auch die Vorgänge auf unserer Erde sich abgespielt haben. Daß es bisher noch nicht gelungen ist auf der Erde gediegenes aus dem Erdinnern stammendes Eisen nachzuweisen, ist kein Beweis gegen die eben erörterte Ansicht, wenn wir bedenken, daß die Laven, welche die Erdoberfläche erreichen, ihrer Temperatur nach nur aus Tiefen von 60 bis 100 km stammen können, während ja nach Wiechert die eisenreiche Zone erst in etwa 1400 km beginnt. Auch die Erdbebenbeobachtungen sprechen für Wiecherts Ansicht, daß die Erde aus einer Silikatkruste und einem Metallkern bestehe.

Man beobachtet bei den Erdbeben verschiedene Stöße. Der erste Stoß geht durch das Erdinnere mit einer Geschwindigkeit von 9,2 km pro Sekunde; er ist infolge der Reibung in dem stark komprimierten Inneren sehr schwach. Der zweite scharfe Stoß geht bei größerer Entfernung mit 3,4 km Geschwindigkeit pro Sekunde viel weniger geschwächt längs der Erdrinde; mitunter kommt er noch einmal, jedoch stark geschwächt, wobei er dann wahrscheinlich auf dem längsten Wege rund um die Erde gegangen ist. Bei kleinen Entfernungen fehlt oft der erste Stoß und die Geschwindigkeit des zweiten Stoßes kann sich bis auf 2 km erniedrigen, wenn die Fortpflanzung in lockeren Schichten vor sich geht. Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit eines Stoßes in einem Quarzberg ist zu 3,6 km berechnet worden. Dieser Wert stimmt gut mit dem beim zweiten Stoß gefundenen überein, wie es auch zu erwarten ist, da die Erdkruste in der Hauptsache aus Silikaten besteht.

2. Temperatur des Erdinnern. Wir wissen, daß die Wärme nach dem Erdinnern ungefähr um 1° C auf 33 m zunimmt (vgl. den Artikel „Erdwärme"). Demnach müßte in etwa 40 km Tiefe eine Temperatur vorhanden sein, bei der alle uns bekannten Gesteine schmelzen würden, wenn nicht der Schmelzpunkt mit wachsendem Druck zunähme. Barus hat nachgewiesen, daß bei Diabas der Schmelzpunkt für 40 Atmosphären (annähernd 155 m Tiefe) um 1° C steigt. Demnach würde die feste Erdrinde höchstens eine Dicke von 50 bis 60 km haben können. Eine genaue Temperaturangabe für das Erdinnere läßt sich nicht machen, jedoch soll versucht werden, die untere und obere Grenztemperatur anzugeben. Die niedrigste Temperatur, die in den zentralen Partien unserer Erde möglich ist, muß sicher höher sein als der Schmelzpunkt irgendeiner von den Vulkanen ausgeworfenen Lava, also höher als 1000 bis 1400°. Da nun diese Laven aus peripherischen Herden und nicht direkt aus dem Erdinnern kommen, so haben sie schon einen Teil ihrer Wärme auf dem Wege vom

Digitized by Google

Inneren bis zum Herd und von da bis zur Oberfläche verloren; ferner wird aber auch Wärme beim Entweichen der Gase aus dem Magma verbraucht, so daß man nicht fehlgehen wird, wenn man als untere Grenztemperatur für das Erdinnere mindestens 2000 bis 3000° annimmt. Schwieriger ist es, eine obere Temperaturgrenze anzugeben. Das eine ist wohl sicher, daß die höchste zu erwartende Temperatur unterhalb der kritischen Temperatur der Stoffe liegen muß, die im Inneren in größerer Menge vorhanden sind, denn erst, nachdem die Temperatur so weit gesunken war, konnte eine Sonderung nach dem spezifischen Gewicht eintreten, während die Stoffe im überkritischen Zustand vollständig gemischt waren. Da experimentelle Bestimmungen über die kritischen Temperaturen von Metallen nicht existieren, so sind wir auf die theoretisch von Guldberg gefundenen Werte angewiesen. Er berechnet aus der absoluten kritischen Temperatur des Quecksilbers (1000°) für die übrigen Metalle folgende Werte:

Cu	3900°	Pb	2000°
Ag	3600°	Sb	5800°
Au	4300°	Bi	4600°
Zn	2600°	Fe	5200°
Cd	2500°	Pd	5700°
Al	3000°	Pt	7000°
Sn	3000°		

Wenn diese Werte nicht allzusehr von den wahren abweichen, so wird man als obere Grenze der Innentemperatur höchstens 7000 bis 8000° C annehmen können. Innerhalb dieser Grenzen von 2000 bis 8000° C dürfte dann die innere Erdtemperatur sicher liegen.

3. Zustand des Erdinnern. 3a) Gasförmig. Die größten Meinungsverschiedenheiten herrschen unter den einzelnen Forschern über den Zustand des Erdinnern. Die einen behaupten es sei fest, die anderen es sei flüssig und die dritten es sei gasförmig. Die Hypothese vom gasförmigen Erdinnern versuchte zuerst Ritter mit Hilfe der mechanischen Wärmetheorie zu begründen. Ausgehend von der Annahme, daß das Mariotte-Gay-Lussacsche Gesetz für Gase selbst bei den höchsten Drucken und Temperaturen noch Gültigkeit hat, findet er für eine mit der Erde hinsichtlich der Größe und Massenverteilung übereinstimmende Gaskugel eine zentrale Dichte gleich der 3,91-fachen mittleren Dichte. Seine weiteren Berechnungen ergeben im Zentrum einen Druck von 31560 Millionen kg und eine Temperatur von 103400°. Bei einer so enorm hohen Temperatur würden alle auf der Erde vorhandenen Stoffe überkritisch sein, sich also durch keinen Druck verflüssigen lassen. Ritter schließt daraus, daß die Erde aus einer festen Kruste und einem gasförmigen Kern bestehe, dessen innerste Partien infolge von Dissoziation die isolierten Grundstoffe bilden. Er kommt ferner noch zu dem merkwürdigen Resultat, daß bei einer der Erde gleich großen Gaskugel Wärmeentziehung keineswegs mit Temperaturabnahme im Innern verbunden ist, sondern daß von der durch die Gravitationsarbeit erzeugten Wärme nur 18,7% durch Strahlung verloren gehen, während 81,3% zur Temperaturerhöhung verwendet werden. Dieses Resultat läßt sich aber nicht unmittelbar auf die Erde übertragen, sondern es müßte erst nachgewiesen werden, ob bei der Erde Wärmeverlust und daraus folgende Kontraktion mit Temperaturerhöhung verbunden ist oder nicht. Ritter ist der Ansicht, es ließe sich weder dies noch das Gegenteil beweisen. Auch Zöppritz sprach sich für ein gasförmiges Erdinnere aus. Er ist der Ansicht, daß die Dichte- und Temperaturbeobachtungen bei der geringen, uns erreichbaren Tiefe für das Verhalten in den zentralen Teilen nicht maßgebend sein können, sondern sich vielmehr mit den verschiedensten Ansichten über das Erdinnere vertragen. Die Abplattung der Erde sei kein Beweis für ein flüssiges Innere, da eine elastische Kugel von der Größe der Erde bei gleicher Rotationsgeschwindigkeit ebenso deformiert würde. Die mittlere Dichte spräche ebenso wie die Präzession für eine Dichtezunahme nach dem Erdinnern. Hopkins hat zuerst den Versuch gemacht, die Präzession zu berechnen, indem er verschiedene Annahmen über den Zustand des Erdinnern macht. Er kommt dabei zu dem Resultat, daß man nur unter der Voraussetzung einer sehr starren Erdkugel die in Wirklichkeit beobachteten Präzessionserscheinungen erklären kann. Darwin hat jedoch später nachgewiesen, daß nicht die Präzession, sondern die Nutation entscheidend sei. Er kommt aber zu dem gleichen Resultat, daß die Erde einen sehr hohen Grad von Starrheit besitzen muß. Von gleicher Wichtigkeit, um einen Aufschluß über das Erdinnere zu erlangen, wie die Präzession und Nutation, sind die Gezeiten. Thomson ging von der Ueberlegung aus, daß die Anziehung von Sonne und Mond nicht nur auf die Wassermassen der Erdoberfläche einen Einfluß ausübt, sondern auch auf die feste Erdrinde. Die Wirkung dieser attraktiven Kräfte, die man bei den Meeren schon lange unter dem Namen der Gezeiten kennt, ist bei der festen Erde um so größer, je geringer die Krustendicke und je geringer die Starrheit der ganzen Erdmasse ist. Da keine Substanz absolut starr ist, so muß die Erdoberfläche bis zu einem gewissen Grade diesen Kräften nachgeben. Daß es bis jetzt nicht gelungen ist, diese Deformationen der festen Erdrinde nachzuweisen, ist kein Beweis gegen ihre Existenz, wohl aber ein Beweis gegen die

Digitized by Google

Annahme, die Erde bestehe aus einer dünnen Kruste mit einem flüssigen Innern; denn dann würde von Ebbe und Flut des Meeres nichts zu merken sein, sondern Land und Wasser würden sich gleichzeitig alle 12 Stunden um einige Fuß heben und senken. Selbst wenn die Starrheit der Erde gleich der des Glases oder Stahles wäre, so würde sie doch noch $^3/_5$ bezw. $^1/_3$ mal soviel nachgeben, als wenn sie flüssig wäre. Es ist daher wahrscheinlich, daß die Starrheit der Erde größer als die des Glases ist. G. Darwin zieht aus seinen Untersuchungen den Schluß, daß die Erde viel starrer sein müsse als Pech bei 0° und daß sie auch nicht etwa aus einer 100 km dicken Kruste, die ein flüssiges Innere umschließt, bestehen könne, da sie in beiden Fällen der Anziehung von Sonne und Mond fast wie eine Wasserkugel folgen würde. Wäre die Erde starr, so müßten besonders die Gezeiten von langer Periode sehr nahe mit der Theorie übereinstimmen. Die Beobachtungen haben aber gerade das Fehlen von Gezeiten langer Periode ergeben, was sich nur dadurch erklären läßt, daß die feste Erde nicht starr ist, sondern selbst Gezeiten hat. Da aber Fluten kurzer Periode nachgewiesen sind, so kann die Erde auch nicht aus zähflüssigem inkompressiblen Material bestehen und es bleibt nach Zöppritz Meinung nur der Ausweg offen, daß sich das Erdinnere in einem vielleicht gasähnlichen Zustand befindet, dessen Eigenschaften die Verzögerung und Veränderung der Fluten zu erklären gestatten. Zöppritz schließt sich im großen und ganzen den Ausführungen von Ritter an. Wenn auch nach seiner Ansicht, das Mariotte-Gay-Lussacsche Gesetz nicht während des ganzen Verdichtungsvorganges gültig gewesen sei, so müßte doch die Mittelpunktstemperatur 20000° übersteigen, eine Temperatur, die sicher oberhalb der kritischen Temperatur aller auf der Erde vorkommenden Stoffe liege. Die zentralen Massen müßten sich daher in einem gasförmigen, so komprimierten Zustand befinden, daß man die ganze Masse nur als starr bezeichnen könnte. Sowie jedoch der Druck nachläßt, reagiert die Masse wie ein Gas und aus diesem Grunde bezeichnet Zöppritz diesen Zustand als gasähnlich. Auch Günther ist der Ansicht, das Erdinnere sei gasförmig. Er unterscheidet sieben, wie er jedoch ausdrücklich hervorhebt, nicht voneinander getrennte, sondern lückenlos ineinander übergehende Zonen. 1. Die feste Kruste. 2. Die Zone der latenten Plastizität. 3. Das Magma. 4. Die Zone gewöhnlicher Flüssigkeit. 5. Die Zone der gewöhnlichen Gase. 6. Die Zone der überkritischen Gase. 7. Zentralball des einatomigen Gases.

Neuerdings hat sich auch Arrhenius für ein gasförmiges Erdinnere ausgesprochen. Er nimmt an, daß in etwa 300 bis 400 km Tiefe die Temperatur so hoch ist, daß kein Stoff dort anders als in Gasform bestehen kann. Diese Gase sollen sich wie ein zähflüssiges Magma verhalten und am ehesten festen Körpern vergleichbar sein.

Gegen diese Hypothesen vom gasförmigen Erdinnern möchte ich folgendes einwenden. Die ganzen Berechnungen Ritters beruhen auf der Voraussetzung, daß das Mariotte-Gay-Lussacsche Gesetz auch für sehr hohe Temperaturen und Drucke Gültigkeit hat. Eine solche Anwendung dürfte aber im Hinblick darauf, daß schon bei den uns zu Gebote stehenden Temperaturen und Drucken bedeutende Abweichungen vorkommen, nicht angängig sein. Abgesehen davon ist aber auch ganz unverständlich, woher die außerordentlich hohe Temperatur des Erdinnern stammen soll. Sie kann nicht von der bei der Kontraktion der Gasmassen zu Dämpfen und Flüssigkeiten erzeugten Wärme übrig sein, da infolge der in diesen Gasen auftretenden Strömungen eine ziemlich gleichmäßige Wärme geherrscht haben muß und bei einer so hohen Temperatur an eine Kondensation nicht zu denken ist. Sie kann aber auch nicht etwa nachträglich entstanden sein, durch die Wärme, welche durch die Kontraktion der äußeren Kruste bei der Abkühlung erzeugt wird, denn sonst müßte ja unsere Erde immer heißer werden; dann wäre aber überhaupt kein Grund zu weiterer Kontraktion vorhanden. Auch die von Zöppritz angeführten Beobachtungen der kosmischen Physik sind kein Beweis dafür, daß das Erdinnere gasförmig sein muß. Sie widersprechen allerdings einem gasförmigen Erdinnern nicht, aber sie erbringen nur den Beweis, daß sich die Erde äußeren Einflüssen gegenüber wie ein sehr starrer Körper verhält, daß sie also nicht aus einem flüssigen Innern von einer dünnen Kruste umgeben bestehen kann.

3b) Flüssig. Die Hypothese vom flüssigen Erdinnern, das von einer festen Kruste umgeben ist findet sich schon im Altertum. Wissenschaftlich wurde sie von Descartes begründet; infolge der Abkühlung seien die äußersten Schichten erstarrt, während sich im Innern noch glutflüssiges Gestein vorfinde. In gleichem Sinne sprachen sich Newton, Fourier und Delaunay aus. Eingehend ist die Hypothese des flüssigen Erdinnern von Mallet zu begründen versucht worden. Er weist die chemische Theorie zur Erklärung der Erdwärme zurück und sucht zu beweisen, daß die Erde aus einem flüssigen Kern bestehe, der von einer festen, sich kontrahierenden Kruste umgeben sei. Die Abkühlung sei an den Polen am größten und infolgedessen habe auch von hier aus die Krustenbildung begonnen. Bei Beginn der Erkaltung sei die Kruste

Digitized by Google

durch Kontraktion stark deformiert worden, und es haben sich durch die Faltungen Linien geringsten Widerstandes gebildet, in deren Nähe das Gestein bis zu großen Tiefen in eng aneinander gepreßte Bruchstücke verwandelt worden sei. Auch jetzt noch kontrahiere sich die Kruste infolge der säkularen Abkühlung. Dadurch würde eine Kompression der festen Rinde bewirkt und durch den Druck, den die Kruste auf den sich zusammenziehenden Kern ausübt, würde das Material längs der Linien geringsten Widerstandes zerdrückt. Die bei diesen Vorgängen geleistete Arbeit werde in Wärme umgesetzt, die sich an den Druck- und Zerquetschungsstellen bis zur Rotglut und Gesteinsschmelze steigern könne und die Ursache des Vulkanismus sei. Es entsteht also die vulkanische Hitze nicht durch Verbindung mit dem flüssigen Innern oder isolierten Lavaseen, sondern durch die bei der Zerquetschung der Kruste in Wärme umgesetzte mechanische Arbeit. Außerdem sei noch die Gegenwart von Wasser nötig, denn sonst müßte sich der Vulkanismus nur in Ergüssen flüssiger Gesteinsmassen äußern.

Mallet sucht dann nachzuweisen, daß unter den in der Natur gegebenen Bedingungen die zur Erklärung der vulkanischen Erscheinungen nötige Wärme entstehen kann und daß die so entstehende Wärme auch ausreichend ist. Diese Hypothese ist von mehreren Forschern angegriffen und widerlegt worden. Roth wendet sich besonders gegen die Annahme von zwei Wärmequellen in der Erde, nämlich Eigenwärme und die durch die Gesteinszermalmung entstehende. Am auffallendsten sei, daß nach Mallets Berechnung nur $^{1}/_{1600}$ der Gesamtwärme für Vulkane verwendet wird, und daß dieses eine eigene Wärmequelle hat, während die übrigen $^{1599}/_{1600}$, die durch Strahlung verloren gehen und für die Thermen nötig sind, vom heißen Kern geliefert werden. Selbst wenn man zugibt, daß die für die Vulkane nötige Wärme durch Gesteinszermalmung geliefert wird, so würde die so entstandene Wärme nur dann ausreichen, wenn die Zerdrückung unter den günstigsten Bedingungen vor sich geht, d. h. plötzlich und ohne Fortführung von Wärme; ferner dürfte sich der Widerstand des zu zermalmenden Gesteins nicht durch die Temperaturzunahme des Erdinnern verringern. Auch Lang hat die Malletsche Hypothese einer eingehenden Kritik unterworfen, wobei er vor allen Dingen den Nachweis liefert, daß die von Mallet seinen ganzen Berechnungen zugrunde gelegte Formel falsch ist; ferner macht er darauf aufmerksam, daß Mallet keine Erklärung dafür gibt, wie sich die feste spezifisch schwerere Kruste an der Oberfläche halten konnte, ohne unterzusinken. Lang nimmt an, daß die Erde einst aus konzentrischen, nach dem spezifischen Gewicht angeordneten Magmaschalen bestanden habe, und daß die Erstarrung an der Oberfläche begonnen habe. Die festen Krustenteile seien dann infolge ihres größeren spezifisches Gewichtes in dem flüssigen Magma untergesunken, in heißere Schichten gekommen und wieder geschmolzen; dies habe sich solange wiederholt, bis die ganze Masse weit genug abgekühlt gewesen sei, daß sich ein fester Kern habe bilden können, um den dann in relativ kurzer Zeit die ganze übrige Masse kristallisiert sei. Diese Annahme verträgt sich nach Langs Ansicht aber nicht mit den Erscheinungen des Vulkanismus, die für ein flüssiges Erdinnere sprächen. Um die Tatsache zu erklären, daß sich die erstarrten Teile des Erdmagmas nicht um das Zentrum, sondern als Kruste an der Peripherie gruppiert haben, sieht sich Lang zu der Annahme genötigt, daß die Erstarrung des Magmas nicht mit einer Volumverminderung, sondern mit einer Volumenvergrößerung verbunden sei. Infolge des noch andauernden Wärmeverlustes, verdicke sich die zuerst gebildete Kruste immer mehr, gleichzeitig aber vermehre sich zufolge der Volumenausdehnung des festwerdenden Magmas der Druck im Innern. Von Zeit zu Zeit suche er sich in vulkanischen Eruptionen oder, wo er zum Druchbrechen der Rinde nicht stark genug sei, durch Hebungen des Geländes auszugleichen. Ueber das Verhalten der verschiedenen Substanzen beim Uebergang vom flüssigen zum festen Zustand sind von einer Reihe von Forschern Untersuchungen angestellt worden. Bischof untersuchte Basalt, Trachyt und Granit und fand, daß diese drei Gesteine beim Uebergang vom flüssigen in den glasigen Zustand eine Kontraktion erleiden, die sich bei der Kristallisation noch bedeutend vermehrt. Zirkel schließt aus Schmelzversuchen an Granat, Vesuvian, Augit, Olivin und verschiedenen Feldspäten auf eine Verminderung des spezifischen Gewichtes beim Uebergang aus dem kristallisierten in den glasigen Zustand. Lang glaubt auf Grund der von Jahr bei der Kristallisation des Eisens beobachteten Volumvermehrung auf eine gleiche Erscheinung bei den Magmen schließen zu dürfen. Gleichfalls Ausdehnung im Momente des Festwerdens beobachtete Millar bei Gußeisen und Whitley bei Gußeisen, Messing, Schlacke und Basalt. Werner Siemens ließ durch seinen Bruder Friedrich Siemens Versuche an Glasflüssen anstellen. Dabei ergab sich, daß sich dünnflüssiges Glas bei der Abkühlung stark zusammenzieht und zähflüssig wird; bei weiterer Temperaturabnahme ist die Zusammenziehung eine nur geringe und im Momente der Erstarrung findet eine geringe Ausdehnung statt. Infolgedessen kann Druck

nur den Uebergang vom dünn- zum zähflüssigen Zustand begünstigen und nicht vom zähflüssigen zum isotrop festen. Nies und Winkelmann unterwarfen alle wichtigen Metalle einer eingehenden Untersuchung. Es ergab sich dabei, daß Zink, Zinn, Wismut, Antimon, Eisen und Kupfer im Momente der Kristallisation eine deutliche Volumenvermehrung erfahren; für Blei und Kadmium war eine sichere Entscheidung nicht zu treffen; aller Wahrscheinlichkeit nach zeigen sie ein gleiches Verhalten. Nies hat acht Jahre später wahrscheinlich zu machen gesucht, daß sich die Silikate gleichfalls im Momente der Erstarrung ausdehnen. Er weist zunächst darauf hin, daß feste Gesteinsstücke nicht nur auf den Laven schwimmen, sondern daß sie auch nach Palmieris Versuchen am Vesuv nach dem Untertauchen wieder in die Höhe kommen. Auch die im Lavasee des Kilaueakraters schwimmende Insel spreche für Ausdehnung im Momente des Festwerdens, da sich allenfalls eine dünne Platte schwereren Materials schwimmend erhalten könne, nicht aber ein Block von solchen Dimensionen (18 m tief, 30 m lang). Vincenti und Omodei untersuchten das spezifische Gewicht von Kadmium, Blei, Wismut, Zinn, Natrium, Kalium, Phosphor und Quecksilber nahe am Schmelzpunkt in festem und flüssigem Zustande und fanden, daß nur Wismut eine Ausnahmestellung einnimmt, indem es sich beim Kristallisieren ausdehnt, während alle übrigen der genannten Stoffe sich zusammenziehen. Die wichtigste Untersuchung über das Verhalten der Silikate hat Barus am Diabas angestellt. Er untersuchte die Abhängigkeit des Schmelzpunktes vom Druck und fand, daß der Schmelzpunkt durch Druck erhöht wird. Die Silikate ziehen sich also bei der Kristallisation zusammen. Weiter ergibt sich, daß, wenn eine Kristallisation bei hohem Druck stattgefunden hat, die schon festen, kristallisierten Massen nach Aufhebung des Druckes wieder flüssig werden müssen. Zu dem gleichen Resultate bezüglich der Silikate kommt Doelter. Er führt zunächst aus, daß weder das Schwimmen der festen Lava auf flüssiger, noch das Wiederauftauchen von untergetauchten Lavastücken ein Beweis für die Ausdehnung im Momente der Erstarrung sei, da beide Vorgänge lediglich durch die poröse Beschaffenheit der festen Laven bedingt seien. Als weitere Fehlerquellen bei den Schwimmversuchen ergeben sich die verschiedene Temperatur des festen und flüssigen Materials, Gasentwickelungen und aufsteigende Strömungen in der Flüssigkeit. Doelter benutzte zur Bestimmung des spezifischen Gewichts der Flüssigkeit Indikatoren, deren Schmelzpunkt höher war als der des geschmolzenen Silikates, so daß sie, ohne geschmolzen zu werden, auf die Schmelztemperatur des zu untersuchenden Silikates erhitzt werden konnten. Es wurde Melanit, Augit, Spodumen, Limburgit, Lava vom Vesuv und Aetna, Nephelinit und Leucitit untersucht und zwar im flüssigen, rasch erstarrten glasigen und langsam kristallin erstarrten Zustande. Dabei ergab sich, daß die flüssigen Massen das geringste spezifische Gewicht haben und die kristallin erstarrten das höchste. Auch Tammann spricht sich verschiedentlich für eine Volumenkontraktion beim Kristallisieren aus und zwar nicht nur für die Silikate, sondern für alle Stoffe mit Ausnahme von Wismut und Wasser. Von besonderer Wichtigkeit ist die Tatsache, daß sich die Schmelzpunktserhöhung mit zunehmendem Druck bald verringert und daß sie ein Maximum erreicht, den maximalen Schmelzpunkt, um bei weiterer Drucksteigerung wieder abzunehmen. Tammann bestimmte den maximalen Schmelzpunkt für einige Substanzen; leider ist er bis jetzt weder für die Silikate, noch sonst einen bei der Zusammensetzung unserer Erde hervorragend beteiligten Stoff experimentell bestimmt. Für eine Kristallisation unter Druck spricht auch die bei Laven gemachte Beobachtung, daß im Innern unter Druck gebildete Kristalle sich sofort wieder auflösen, wenn die Lava an die Oberfläche kommt und der Druck aufgehoben wird. Ferner ist noch zu beachten, daß die Schmelzpunkte kristallisierter Körper oft höher sind, als die derselben Substanzen im glasigen Zustand, z. B. Orthoklas (1215° resp. 1190°) und Olivin (1280° resp. 1255°); auch kristallisieren diese Schmelzen nur, wenn man sie einige Zeit auf einer über dem Schmelzpunkt liegenden Temperatur erhält. Wir können also vorläufig nur sagen, daß es wahrscheinlich ist, daß die im Erdinnern vorkommenden Substanzen beim Kristallisieren ein kleineres Volumen einnehmen, daß also unter Druck der kristallisierte Zustand der beständigere ist.

Airy sucht die Flüssigkeit des Erdinnern aus der Kant-Laplaceschen Theorie abzuleiten, indem er von der Annahme ausgeht, daß die Erde durch Verdichtung von Gasmassen entstanden sei und daß die zentralen Partien der Erde noch so heiß seien, daß sie sich nur im glutflüssigen Zustand befinden könnten. Hennessy wendet sich gegen Thomsons und Darwins Beweis von der Starrheit der Erde. Die von diesen beiden Forschern gemachten Voraussetzungen weichen so weit von den tatsächlichen Verhältnissen ab, daß auf diese Weise die Unmöglichkeit eines flüssigen Erdkerns nicht erwiesen sei. Ferner haben sich auch Woodward und Toula für ein flüssiges Erdinnere ausgesprochen.

Digitized by Google

3c) Fester Zustand. Für ein festes Erdinnere trat zuerst Marschall von Bieberstein ein, der die Erde als festes Agglomerat von Meteoriten ansah. Lamont schloß aus den Störungen der magnetischen Kurven auf einen kompakten Eisenkern. Am eingehendsten hat Thomson die Festigkeit der zentralen Erdpartien zu begründen versucht. Er stützt seinen Beweis einerseits auf die Präzession und Nutation, andererseits auf die Experimente von Bischof, daß sich die Silikate bei der Kristallisation zusammenziehen. Daraus schließt er aber fälschlicherweise, daß die an der Erdoberfläche erkalteten Teile bis zum Zentrum eingesunken seien, und daß von hier aus die Erstarrung vor sich gegangen sei. Poulett Scrope hält die Starrheit nur für eine bedingte, die bei Aufhebung des Druckes auch sofort wieder aufgehoben wird. Pfaff ist der Ansicht, daß die Erde aus einem durch Druck verfestigten Kern, einer flüssigen Zwischenschicht und einer festen Kruste bestehe. Somit kann es nur für die innersten Partien eine Ausnahme geben, wenn nämlich für sie der maximale Schmelzpunkt überschritten ist; dann würden sich diese Massen im isotrop flüssigen Zustand befinden, jedoch nur so lange, als der maximale Schmelzpunkt überschritten ist. Bei fortschreitender Abkühlung gehen auch sie in den kristallisierten Zustand über. Solange jedoch keine Beobachtungen über den maximalen Schmelzpunkt eines Metalls oder Silikats vorliegen, dürfte es am wahrscheinlichsten sein, anzunehmen, das Erdinnere befinde sich im plastischen kristallisierten Zustand, der bei Aufhebung des Druckes in den isotrop flüssigen, ja vielleicht sogar in den gasförmigen übergehen würde.

Literatur. **S. Arrhenius,** *Das Werden der Welten. Deutsch von L. Bamberger. Leipzig 1908.* — **Barus,** *High temperature work in igneous fusion and ebullition, chiefly in relation to pressure. Bulletin of the United States Geological Survey, 1893, No. 103.* — **Derselbe,** *The fusion constants of igneous rock. — Part. II. The contraction of molten igneous rock on passing from liquid to solid. Philosophical Magazine, 1893, V. Serie, XXXV, S. 173 bis 190.* — **Dana,** *On some Results of the Earth's Contraction from cooling, including a discussion of the Origin of Mountains, and the Nature of the Earth's Interior. The American Journal of Science and Arts, 1873, III, Serie V, S. 423 bis 448; VI, S. 6 bis 14.* — **G. H. Darwin,** *On the Precession of a Viscous Spheroid, and on the remote History of the Earth. Philos. Trans. of the Royal Society of London, 1879, CLXX, II, S. 447 bis 538.* — **Günther,** *Handbuch der Geophysik, I, 2. Aufl. Stuttgart 1879.* — **W. Hopkins,** *Researches in physical Geology.* — **Derselbe,** *On the Phenomena of Precession and Nutation, assuming the Fluidity of the Interior of the Earth. Philos. Trans. of the Royal Society of London 1839, Vol. CXXIX, S. 381 bis 423.* — **Derselbe,** *On Precession and Nutation, assuming the Interior of the Earth to be fluid and heterogeneous. Philos. Trans. 1840, Vol. CXXX, S. 193 bis 208.* — **Derselbe,** *On the Thickness and Constitution of the Earth's Crust. Philos. Trans. 1842, Vol. CXXXII, S. 43 bis 55.* — **O. Lang,** *Die Bildung der Erdkruste. Zeitschrift für die gesamten Naturwissenschaften, 1873, VII, N. F. (XLI, d. g. F.), S. 1 bis 80.* — **R. Mallet,** *Volcanic energy: an attempt to develop its true origin and cosmical relations. Philos. Trans. of the Royal Soc. of London 1873, CLXIII, I, S. 147 bis 227.* — **Ritter,** *Untersuchungen über die Höhe der Atmosphäre und die Konstitution gasförmiger Weltkörper. Wiedemanns Annalen der Physik, 1878, Bd. CCXLI (V, N. F.), S. 405 bis 425, 543 bis 558; 1879, Bd. CCXLII (VI, N. F.), S. 135 bis 144; Bd. CCXLIV (VIII, N. F.), 1879, S. 157 bis 183; 1880, Bd. CCXLVI (X, N. F.), S. 130 bis 148.* — **Derselbe,** *Anwendungen der mechanischen Wärmetheorie auf kosmologische Probleme. Hannover 1879.* — **Tammann,** *Kristallisieren und Schmelzen, ein Beitrag zur Lehre der Aenderungen des Aggregatzustandes. Leipzig 1903.* — **W. Thomsen,** *On the Rigidity of the Earth. Philos. Trans. of the Royal Society of London, CLIII, 1863, S. 573 bis 582.* — **F. Toula,** *Verschiedene Ansichten über das Innere der Erde. Wien 1899.* — **H. Thiene,** *Temperatur und Zustand des Erdinnern. Jena 1907.* — **Wiechert,** *Ueber die Massenverteilung im Innern der Erde. Nachrichten von der Königl. Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, mathem.-physik. Klasse, 1897, S. 221 bis 243.* — **K. Zöppritz,** *Ueber die Mittel und Wege, zu besserer Kenntnis vom inneren Zustand der Erde zu gelangen. Verhandlungen des 1. Deutschen Geographentages zu Berlin am 7. und 8. Juni 1881, S. 15 bis 28.*

H. Thiene.

Erdmann

Hugo.

Geboren am 8. Mai 1862 in Preußisch Holland, gestorben am 25. Juni 1910 infolge eines Unfalles auf dem Müggelsee, war seit 1885 in Halle als Dozent und außerordentlicher Professor, seit 1901 als Ordinarius für anorganische Chemie an der Technischen Hochschule Berlin tätig. Seine zahlreichen Experimentaluntersuchungen umfassen weite Gebiete der organischen wie anorganischen Chemie und sind in Liebigs Annalen, in den Berichten der Deutschen chemischen Gesellschaft und im Journal für praktische Chemie veröffentlicht. Abgesehen von einer umfangreichen „Präparatenkunde", hat sein gründlich und originell bearbeitetes Lehrbuch der anorganischen Chemie vielfach Eingang gefunden. In fesselnder Weise hat er in Einzelschriften über seine Reisen nach dem Kaukasus und Alaska berichtet.

E. von Meyer.

Digitized by Google

Erdmann

Otto Linné.

Geboren am 11. April 1804 in Dresden, gestorben am 9. Oktober 1869 in Leipzig, wo er seit 1825 als Dozent, dann als Professor der Chemie erfolgreich gewirkt hat. Seine zahlreichen, sowohl der anorganischen wie organischen Chemie angehörenden Experimentaluntersuchungen tragen oft ein technisches Gepräge; sie sind meist in dem von ihm begründeten Journal für praktische Chemie (seit 1834), das aus seinem Journal für technische und ökonomische Chemie (1828 bis 1833) hervorgegangen war, veröffentlicht.

Besonders hervorzuheben sind seine mit Marchand ausgeführten sehr genauen Bestimmungen der Atomgewichte zahlreicher Elemente (u. a. des Kohlenstoffs, Wasserstoffs, Calciums, Kupfers, Quecksilbers). Von Erdmanns größeren Werken ist außer einem in mehreren Auflagen erschienenen Lehrbuch der Chemie seine Warenkunde als verdienstlich zu nennen, die, in vielen Auflagen herausgegeben, bis in die Gegenwart viel benutzt worden ist. Seine aus reichen Erfahrungen abgeleiteten Ansichten über die chemische Ausbildung legte er in der zu wenig bekannten Schrift „Ueber das Studium der Chemie" (1861) nieder.

E. von Meyer.

Erdmetalle

ist der Sammelname für Aluminium und die Metalle der Cer- und der Yttriumgruppe. Die Vertreter dieser beiden Gruppen werden als die Metalle der „seltenen Erden" bezeichnet (vgl. die Artikel „Borgruppe", „Chemische Elemente" und „Erden, Mineralien mit seltenen Erden").

Erdwärme.

1. Klimatische Wärme. 2. Eigene Wärme: a) Beobachtungen in Bergwerken. b) Beobachtungen in Brunnen. c) Beobachtungen bei Tiefbohrungen. d) Beobachtungen an Thermen und Laven. 3. Größe der geothermischen Tiefenstufe. 4. Zunahme der Erdwärme mit der Tiefe. 5. Ursachen der Erdwärme.

1. Klimatische Wärme. Obgleich sich unsere Erde in dem Weltenraum, dessen Temperatur sehr niedrig ist, befindet, hat sie doch große Wärmevorräte. Die Erdwärme stammt nicht aus einer Quelle, sondern die Erde erhält einen kleinen Teil ihrer Wärme von der Sonne, während der weitaus größere Teil aus einer im Erdinnern befindlichen Wärmequelle herrührt. Die Klimaschwankungen der Erdoberfläche dringen nur bis zu einer geringen Tiefe ein, jenseits dieser sogenannten neutralen Schicht ist von einem Temperaturwechsel nichts mehr zu merken. Diese Tatsache wurde zuerst von de la Hire und Cassini gegen Ende des 17. Jahrhunderts gefunden. Sie stellten fest, daß ein im Keller der Pariser Sternwarte aufgestelltes Thermometer seinen Stand fast nicht änderte, unbekümmert um den Wechsel der Temperatur an der Erdoberfläche. Je geringer an einem Orte die Klimaschwankungen sind, um so näher liegt die neutrale Schicht der Erdoberfläche, je größer die Unterschiede zwischen Sommer und Winter sind, um so tiefer liegt diese Schicht. Infolgedessen ist die neutrale Schicht am Aequator der Erdoberfläche am nächsten und an den Polen am weitesten davon entfernt. Sie ist im großen und ganzen einem Ellipsoid ähnlich mit starker Abplattung an den Polen. Die zahlenmäßigen Angaben der einzelnen Forscher über die Tiefe der neutralen Schicht weichen ziemlich voneinander ab. So gibt z. B. Boussingault ½ m Tiefe, Wild 5 m und Richthofen $^2/_3$ bis 1 m für die Tropen an. Fourier behauptet, daß die täglichen Wärmeschwankungen in 3 m Tiefe und die jährlichen in weniger als 60 m nicht mehr wahrnehmbar seien. Naumann verlegt die Fläche konstanter Temperatur in der gemäßigten Zone in 60 bis 80 Fuß Tiefe. Man kann wohl sagen, daß in 20 bis 25 m Tiefe der Wechsel der Oberflächentemperatur sich nicht mehr geltend macht. Dringen wir also von der Erdoberfläche nach dem Erdinnern ein, so wird die Wärme bis zur neutralen Schicht je nach der Jahreszeit zu- oder abnehmen.

2. Eigenwärme. Ganz anders jenseits der neutralen Schicht. Von dieser aus nach dem Mittelpunkt finden wir, soweit bis jetzt beobachtet, stets eine Zunahme der Temperatur.

2a) Beobachtungen in Bergwerken. Die ersten auf Beobachtungen beruhenden Angaben über die Zunahme der Wärme nach dem Erdinnern finden sich bei dem Jesuitenpater Athanasius Kircher (1665). Aus den Angaben von Schemnitzer Bergleuten erfuhr er, daß ein Bergwerk um so wärmer sei, je tiefer es sei. In gleichem Sinne äußerte sich der Physiker Boyle (1680) und der Mediziner Boerhave (1732). In den Beginn des 19. Jahrhunderts fallen die ersten Versuche, um die Temperaturzunahme in Gruben zahlenmäßig zu bestimmen. Während Fox und Lean die Temperatur der Grubenluft und Grubenwässer in den Zinnbergwerken von Cornwall maßen, um daraus die Temperaturzunahme festzustellen, versenkte Cordier seine auf gleichen Gang geprüften Thermometer in das Gestein selbst. Er beobachtete in den drei Gruben zu Carmeaux (Depart. Tarn), Decise (Depart. Nièvre), Littry (Depart. Calvados) und fand das Dasein einer inneren Wärme, welche der Erde eigentümlich ist, nicht von den Sonnenstrahlen her-

Digitized by Google

rührt und schnell mit der Tiefe zunimmt. Die Zunahme der Wärme ist nicht überall gleich; sie beträgt im allgemeinen 25 m für einen Grad. Die Beobachtungen Kupffers ergaben in einigen Gruben des Urals eine „geothermische Tiefenstufe“ von 24,8 m, in Cornwall, Sachsen und Frankreich 26,9 m für 1° R. Im Jahre 1834 veröffentlichte Reich eine Zusammenstellung der in den sächsischen Bergwerken gemachten Beobachtungen und fand als Mittelwert 41,84 m Tiefenzunahme auf 1° C Temperaturzunahme. Auch alle späteren Beobachtungen in Gruben haben eine wenn auch oft sehr verschiedene Temperaturzunahme ergeben; so fand man z. B. im Adalbertschacht bei Pribram in 889,3 m Tiefe eine Temperatur von 21,8° C, in einem Kupferbergwerk der Keweenaw-Halbinsel (Michigan) in 1396 m Tiefe nur 26,1° C. Aus den Beobachtungen in Bergwerken läßt sich nur der Schluß ziehen, daß mit wachsender Tiefe die Temperatur zunimmt. Die Größe der Temperaturzunahme ist jedoch infolge vieler störender Einflüsse (Luftströmungen, Eindringen der Tagewässer, Anwesenheit der Arbeiter) aus diesen Beobachtungen nicht festzustellen. Ganz ähnlich liegen die Verhältnisse bei Tunnels. Auch diese Beobachtungen können nur die allgemeine Temperaturzunahme beweisen, ohne für die Aufstellung eines Gesetzes brauchbar zu sein. Im St. Gotthardtunnel stieg die Temperatur auf 30,43° C und in dem 1907 fertiggestellten Simplontunnel sogar auf 53,6° C.

2b) Beobachtungen an Quellen. Die ersten genauen Beobachtungen in artesischen Brunnen verdanken wir Kupffer. Er beobachtete in vier artesischen Brunnen in der Nähe von Wien und fand eine geothermische Tiefenstufe von 25,4 m für 1° R. Für einen artesischen Brunnen bei Rochelle fand er 24,6 m für 1° R. Eine besonders abweichende Tiefenstufe erhielten Matteuci und Pilla in einem Brunnen am Monte Massi in Toskana. Sie erklären die äußerst rasche Zunahme von 1° C auf 13 m durch die Annahme, in Italien befinde sich die zentrale Hitze näher der Oberfläche als z. B. in England, wodurch auch Italien so reich an Vulkanen und Erdbeben sei. Außer diesen Beobachtungen finden sich bei Naumann noch die folgenden:

Bohrbrunnen von La Grenelle in Paris		Bohrbrunnen von Neusalzwerk in Westfalen	
Tiefe in Pariser Fuß	Temperatur in C°	Tiefe in Pariser Fuß	Temperatur in C°
917	22,2	580	19,7
1231	23,75	1285	27,5
1555	26,43	1935	31,4
1684	27,70	2144	33,6

In einem artesischen Brunnen in Mondorff (Luxemburg) fand man in 2066 Fuß Tiefe 34° C. Wenn in den uns erreichbaren Tiefen die Temperatur wie die Tiefe zunimmt, ergeben sich daraus folgende Werte für die geothermische Tiefenstufe für 1° C.

Neusalzwerk	92,27 Fuß
La Grenelle	95,0 „
Mondorff	91,1 „

Ferner fand man bei St. André (Eure) 95,3 Fuß und bei Rouen 90,8 Fuß. Ziemlich abweichende Werte wurden bei Pitzbuhl bei Magdeburg (80 Fuß) und bei Artern in Thüringen (120 Fuß) gefunden.

2c) Beobachtungen bei Tiefbohrungen. Im Anfang des vorigen Jahrhunderts begann man genauere Beobachtungen in Bohrlöchern anzustellen. Magnus beobachtete im Bohrloche zu Rüdersdorf bei Berlin, das eine Tiefe von 600 Fuß hatte, und fand in

380 Fuß Tiefe	13,7° R
500 „ „	14,2° R
655 „ „	15,8° R 15,9° R

Als mittlere Jahrestemperatur von Rüdersdorf nimmt er 7,6° R an und findet also auf 655° eine Temperaturzunahme von (15,9—7,6) 8,3° R, d. h. 1,25° R auf 100 Fuß. Unter besonderer Berücksichtigung der störenden Einflüsse fand Erman in Rüdersdorf eine Temperaturzunahme von 1° R für 90 Fuß Tiefenzunahme. Eine sehr günstige Gelegenheit zu einer möglichst genauen Beobachtung der Temperaturzunahme bot sich im Bohrloche zu Pregny bei Genf. Man bohrte 682 Fuß tief, ohne fließendes Wasser zu erhalten; anfangs erhielt man einen dicken Schlamm, später nur feuchte Erde. Auf diese Weise waren sowohl die störenden Wasserzirkulationen als auch die Luftströmungen beseitigt. Die Beobachtungen ergaben 114,8 Fuß Tiefenzunahme auf 1° R. Eine besonders rasche Temperaturzunahme fand Mandelsloh zu Neuffen am Fuße der schwäbischen Alb. Das Bohrloch war 1186 Fuß tief im Dogger und Lias. Schwarze bituminöse Schiefertone wechselten mit 1 bis 4 Fuß mächtigen Kalksteinflötzen. Das ganze Gestein war mit Schwefelkies durchsetzt. Die Beobachtungen in dem 2 Zoll weiten Bohrloch ergaben eine Wärmezunahme von 3,28° C auf 100 Fuß oder 1° C auf 10,5 m, einen außerordentlich kleinen Wert für die geothermische Tiefenstufe. Ueber die Ursachen dieser äußerst raschen Temperaturzunahme ist man bis heute noch nicht einig. Daubrée glaubt, daß es die Nachwirkung früherer basaltischer Durchbrüche sei, die erwärmend noch heute auf jene Schichten einwirkten. Bischof hält es nicht für unmöglich, daß in Klüften aufsteigende Wasserströme die Wärme tieferer

Digitized by Google

Schichten den darüberliegenden zuführen und so seit langen Zeiten einen erwärmenden Einfluß ausüben. Branca hat später nachgewiesen, daß sich Mandelsloh sowohl verrechnet hat, als auch, daß er eine unzulässige Art der Berechnung angewendet hat; nach Beseitigung dieser zwei Fehler wird die geothermische Tiefenstufe zwar etwas größer, ergibt aber immer noch den außerordentlich kleinen Wert von 11,1 m auf 1° C. Branca nimmt als Ursache dieser abnorm raschen Temperaturzunahme einen flachgelegenen, isolierten Schmelzherd unter jener Gegend an, der zugleich das Material für die dort so zahlreich vorhandenen Vulkandurchbrüche geliefert haben soll. Höfers Ansicht, daß die durch das ganze Bohrloch verbreiteten bituminösen Liasschiefer die Ursache der raschen Temperaturzunahme seien, weist Branca als unrichtig zurück. Denn einesteils haben diese Schiefer überhaupt nur die geringe Mächtigkeit von 30 Fuß 4 Zoll, anderenteils findet in diesen Schichten nicht einmal ein Anwachsen der Temperatur statt. Im Jahre 1867 begann man bei Sperenberg, 5½ Meilen südlich von Berlin, ein Bohrloch anzulegen, das für die Temperaturbeobachtungen von allergrößter Wichtigkeit wurde. Man durchbohrte der Reihe nach 2 Fuß Schutt 278,5 Fuß Gips, 5 Fuß Gips mit Anhydrit und von 283 Fuß an reines Steinsalz. 1871 hatte das Bohrloch eine Tiefe von 4052 Fuß, wovon sich die unteren 3769 im Steinsalz befanden. Gerade weil ein so großer Teil des Bohrlochs in demselben Gestein lag, war es für die Temperaturbeobachtungen so geeignet. Bis 444 Fuß war das Innere mit einer Eisenblechverröhrung ausgekleidet und daher für Temperaturbeobachtungen nicht zu brauchen. Da bei der großen Tiefe die Wasserzirkulation eine bedeutende war, so mußte man einzelne Teile der im Bohrloch befindlichen Wassersäule abschließen, um die wahre Gesteinstemperatur zu bekommen; anderenfalls wäre in den oberen Schichten die Temperatur zu hoch und unten zu tief gefunden worden. Roth nimmt als mittlere Jahrestemperatur von Sperenberg 7,18° R an und berechnete aus den B.obachtungen folgende Temperaturreihe:

Tiefe in Fuß	Temperatur in ° R	Zunahme für 100 Fuß Temperatur in ° R
700	15,654	1,097
900	17,849	1,047
1100	19,943	0,997
1300	21,937	0,946
1500	23,830	0,896
1700	25,623	0,846
1900	27,315	0,795
2100	28,906	0,608
3390	36,756	

Daraus ergibt sich für 100 Fuß Tiefenzunahme 0,904° R Temperaturzunahme, oder eine geothermische Tiefenstufe von 27,8 m auf 1° C.

Diese Beobachtungen zeigen zwar, daß mit wachsender Tiefe die Temperatur zunimmt, aber sie geben uns nicht die wahre Gesteinstemperatur, denn infolge der auftretenden Zirkulation findet man an der Bohrlochsohle die Temperatur zu gering, in den oberen Partien zu hoch. Diese Differenzen zwischen der Gesteinstemperatur und der des im Bohrloch befindlichen Wassers sind natürlich um so größer, je tiefer das Bohrloch ist, da dann den oberen Schichten um so mehr Wärme zugeführt wird. Dies sieht man sofort, wenn man die Beobachtungen im Bohrloch I und II in Sperenberg vergleicht. I war zur Zeit der Beobachtung 2043 bis 2617 Fuß und II nur 490 Fuß tief.

I Tiefe in Fuß	Temperatur in ° R	II Tiefe in Fuß	Temperatur in ° R
100	11,0	100	9
200	11,6	200	10,4
300	12,3	300	11,5
400	13,6	400	12,5

Den Nachweis, daß am Grunde des Bohrlochs die Temperatur zu klein gefunden wurde, erbrachte Dunker auf folgende Weise. In 3390 Fuß Tiefe ließ er mit halber Weite 17½ Fuß vorbohren und schloß diese kleine Wassersäule durch einen mit Werg und Leinwand umwickelten Stopfen ab. Als Mittel ergab sich aus den Beobachtungen mit Abschluß 36,55° R, während die Beobachtungen ohne Abschluß 33,6 ergaben. Nachdem sich Dunker davon überzeugt hatte, daß die wahre Gesteinstemperatur nur dadurch zu ermitteln sei, daß man kleine Wassersäulen solange abschloß, bis sie die Temperatur des umliegenden Gesteins angenommen haben, konstruierte er einen besonderen Abschlußapparat, da die Beobachtung mit dem Vorbohren einesteils sehr umständlich war, andererseits aber eine nachträgliche Beobachtung in höheren Teilen des Bohrlochs überhaupt unmöglich ist. Nach Ausschaltung aller ungenügenden Beobachtungen und nach Anbringung der nötigen Korrektionen bleiben folgende übrig:

Tiefe in Fuß	Temperatur in ° R
700	17,275
900	18,780
1100	21,147
1300	21,510
1500	23,277
1700	24,741
1900	26,504
2100	28,668
3390	37,238

Daraus ergibt sich eine geothermische Tiefenstufe von 42 m auf 1° R oder von

Digitized by Google

33,7 m auf 1° C. Zum zweiten Male wurde der Dunkersche Abschlußapparat in dem 577 m tiefen Bohrloch von Sudenberg bei Magdeburg verwandt, und eine geothermische Tiefenstufe von 32,3 m auf 1° C gefunden. Ebenfalls unter Dunkers Leitung wurde in Schladebach bei Dürrenberg ein Bohrloch gemacht, das die ansehnliche Tiefe von 1748 m erreichte. Als die Beobachtungen begannen war das Bohrloch 1240 m tief und bis dahin verröhrt. In dem unverröhrten Teile stieg die Temperatur von 36,2° in 1266 m Tiefe bis auf 45,3° in 1716 m Tiefe. Später stellte man auch von 36 bis 1236 m Beobachtungen an, die eine Temperaturzunahme von 8,8 bis 35,2° R ergaben, die also mit den übrigen Werten trotz der Verröhrung gut übereinstimmen. Daraus ergibt sich eine Tiefenstufe von 35,7 m auf 1° C. Noch tiefer ist das Bohrloch von Paruschowitz bei Rybnik in Oberschlesien, das eine Tiefe von 2003,34 m hat. Man führte von 6 bis 1959 m Temperaturbeobachtungen aus, die jedoch eine ziemlich unregelmäßige Wärmezunahme ergaben. Diese Unregelmäßigkeit ist durch die wechselnde Gesteinszusammensetzung bedingt. Man durchsank nicht weniger als 82 Steinkohlenflöze, die mit anderen Gesteinen wechselten. Henrich fand, daß auch hier die Temperatur proportional der Tiefe zunimmt und zwar 31,82 m auf 1° C. Das tiefste Bohrloch ist seit 1909 Czuchow II, etwa 2 km nordwestlich vom gleichnamigen Dorf zwischen Gleiwitz und Rybnik. Es ist 2239,72 m tief. Die Gesteinsverhältnisse sind ähnlich dem etwa 10 km entfernten Bohrloch von Paruschowitz. Die Temperatur nahm gleichmäßig mit der Tiefe zu, abgesehen von den durch Kohleneinlagerungen hervorgerufenen Unregelmäßigkeiten; sie stieg in 2221 m Tiefe auf 83,4° C. Die geothermische Tiefenstufe ergibt sich zu 31,8 m auf 1° C.

2d) Thermen und Laven. Ein weiterer Beweis für die Temperaturzunahme nach dem Erdinnern ist das Vorhandensein der heißen Quellen, die je nach der Tiefe, aus der sie stammen, eine mehr oder weniger hohe Temperatur haben. Von den bekannten Thermen Mitteleuropas hat der Solsprudel von Soden 29° C, der Sprudel von Nauheim 37°, die Badequelle von Ems 50°, der Kochbrunnen in Wiesbaden 68°, der Sprudel in Karlsbad 75° und die Höllenquelle in Baden-Baden 86° C. Ferner seien noch die intermittierenden heißen Springquellen oder Geysirs erwähnt, von denen die bekanntesten der Geysir auf Island und die Geysirs des Yellowstoneparks sind. Die Geysireruptionen kommen dadurch zustande, daß das in der Röhre befindliche Wassser durch die innere Erdwärme auf Temperaturen über 100° erhitzt wird, und daß der sich bildende Wasserdampf die darüber befindliche Wassersäule herausschleudert. Daß noch wesentlich höhere Temperaturen als alle bisher erwähnten im Erdinnern vorhanden sind, beweisen uns die Laven. Beim Vesuv hat man am unteren Ende eines Lavastromes eine Temperatur von 1000 bis 1100° C gefunden. Vor dem Verlassen des Vulkanschlotes dürfte die Temperatur nicht höher als etwa 1400° sein, da sich sonst nicht bereits beim Austritt der Lava Leucit-und Olivinkristalle vorfinden könnten.

3. Größe der geothermischen Tiefenstufe. Ueberblickt man das Ergebnis aller bisher gemachten Temperaturbeobachtungen, so ergibt sich daraus eine Temperaturzunahme mit wachsender Tiefe. Die Werte für die geothermische Tiefenstufe schwanken zwischen 10 und 40 m für 1° C. Der wahrscheinlichste Wert dürfte etwa 33 m auf 1° C sein. Fragt man sich nach der Ursache der starken Abweichungen der einzelnen Beobachtungen, so ergibt sich, daß sie zum einen Teil in Beobachtungsfehlern begründet sind, daß zum anderen Teil aber tatsächlich Unterschiede in der geothermischen Tiefenstufe vorhanden sind. Letztere sind begründet durch lokale Erwärmungen infolge der Nähe von Vulkanen oder unterirdisch erstarrenden Magmen oder infolge chemischer Prozesse, wie z. B. die Zersetzung von Pyrit in Steinkohlenflözen. Auch die in der Erdrinde zirkulierenden Wassermassen beeinflussen die geothermische Tiefenstufe, indem sie teils erwärmend, teils abkühlend wirken. Ferner ist noch die Wärmeleitfähigkeit der unsere Erde zusammensetzenden Stoffe von wesentlichem Einfluß. Die Wärmeleitungskoeffizienten der in Betracht kommenden Substanzen weichen sehr voneinander ab, wie ein Blick auf folgende Tabelle zeigt.

Marmor	0,0054 —0,0352
Basalt	0,00317 —0,0067
Feuerstein	0,0024
Kalktuff	0,01523
Sandstein	0,0024 —0,03072
Gips	0,0031
Quarz	0,01576
Gneiß	0,0005770—0,0081
Porphyr	0,0083
Granit	0,0004159—0,0097
Lava	0,1358
Steinkohle	0,000297 —0,00044
Steinsalz	0,0137
Eisen	0,09—0,2 (je nach den Beimengungen)

Es kann uns daher nicht wundern, daß man in verschiedenen Gesteinsschichten ungleiche Werte für die geothermische Tiefenstufe findet, z. B. in Erzbergwerken besonders große Werte.

4. Zunahme der Wärme mit der Tiefe. Alle bisherigen Berechnungen der geothermischen Tiefenstufe sind unter der Annahme gemacht, daß die Wärme proportional

Digitized by Google

der Tiefe zunimmt. Ob diese Annahme jedoch richtig ist oder ob die Wärme langsamer oder schneller zunimmt als die Tiefe soll jetzt erörtert werden. Reich sowohl als auch Bischof kamen zu dem Resultat, daß sich aus den bis zur ersten Hälfte des vorigen Jahrhunderts an der Erde gemachten Beobachtungen ein Gesetz über die Wärmezunahme nicht ableiten läßt. Bischof versuchte daher auf experimentelle Weise die Abkühlungsverhältnisse einer erkaltenden Kugel zu erforschen. Er ließ Basaltkugeln gießen, an denen er bei der Abkühlung Temperaturbeobachtungen anstellte. Die Kugel hatte einen Durchmesser von 21 Zoll und war mit einem 1½ Zoll dicken Lehmmantel umgeben, der im Innern mit dünnen Eisenstäben und Drähten gebunden war. Das Ganze befand sich in einem eisernen Kessel, unmittelbar vor dem Schmelzofen und war ringsum mit Formsand eingedämmt. Die Schmelzhitze des Basalts war größer als die des Kupfers, da ein eingetauchter Kupferdraht schmolz, also sicher über 1084° R. Vier Stunden nach dem Guß nahm man die Kugel mit dem Lehmmantel heraus und setzte sie zur freieren Wärmeausstrahlung auf einen Trichter von Eisenblech. Acht Stunden nach dem Guß hatte der Mantel eine Temperatur von 240° R und nun begann man mit den Temperaturbeobachtungen. Es wurden vier Thermometer eingesetzt, No. I in den Mantel, II und III wollte man 2 bezw. 7 Zoll tief und IV in den Mittelpunkt setzen. Es waren aber beim Guß die Röhren, welche die Thermometer aufnehmen sollten geschmolzen und voll Basalt gelaufen. Man versuchte zwar die Löcher auszubohren, jedoch konnte man das zweite Loch nur bis zu 2 Zoll, das dritte und vierte nur bis zu 4 Zoll ausbohren; dies war insofern ein Nachteil, als die Röhren im dritten und vierten Loch tiefer gingen und daher die Temperatur infolge der Wärmeleitung höher war.

Die Beobachtungen ergaben, daß die Temperaturzunahme in der erkaltenden Kugel in einer geometrischen Reihe erfolgt. Naumann ist der Ansicht, daß die Temperatur in den obersten Schichten wie die Tiefe zunehme, während dann die Zunahme eine langsamere sei. Er glaubt dies trotz der geringen Tiefe, bis zu der unsere Beobachtungen reichen, aus den Messungen von La Grenelle beweisen zu können, indem er für die ersten 677 Fuß eine geothermische Tiefenstufe von 81,6 Fuß und für die folgenden 792 Fuß eine solche von 123 Fuß berechnet. Lord Kelvin (W. Thomson) hat versucht, auf theoretischem Wege die Temperaturverteilung im Erdinnern zu erforschen. Er wendet zwei von Fourier aufgestellte Gleichungen auf die Erde an. Mit Hilfe dieser beiden Gleichungen findet Thomson, daß wahrscheinlich 100 Millionen Jahre seit Beginn der Abkühlung der Erde verstrichen sind, denn dann ergibt sich die mit den Beobachtungen übereinstimmende Temperaturzunahme von 50 Fuß auf 1° Fahrenheit. Gleichzeitig benutzt er diese Berechnung, um die Verteilung der Temperatur in der Erde 100 Millionen Jahre nach Beginn der Abkühlung zu berechnen und graphisch darzustellen. Dabei ergibt sich, daß die Temperatur für die ersten 100000 Fuß um $^1/_{51}$° F für einen Fuß zunimmt, worauf die Zunahme eine geringere ist, bei 400000 Fuß ungefähr $^1/_{141}$ F, bei 800000 Fuß weniger als $^1/_{2560}$° F.

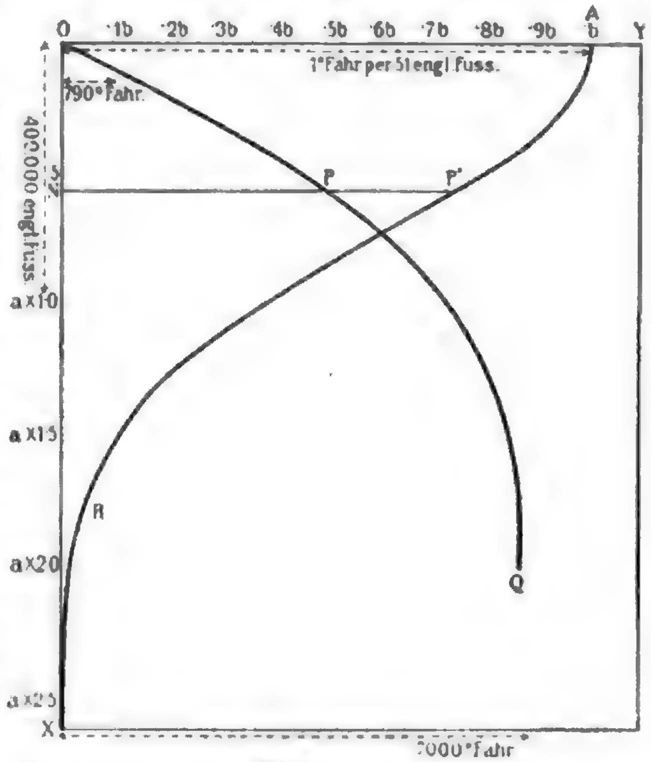


Fig. 1.

Die Kurve OPQ zeigt den Ueberschuß der Temperatur über die der Oberfläche. Die Kurve AP'R zeigt die Größe der Temperaturzunahme nach dem Mittelpunkt der Erde.

Dunker leitete aus seinen Beobachtungen in Sperenberg eine Formel ab, nach der zwar die Temperatur mit wachsender Tiefe zunimmt, jedoch immer langsamer. Er bezeichnet mit S die Tiefe einer Schicht in Fuß und mit T die dort herrschende Temperatur in R° und erhält so $T = 7{,}18 + 0{,}012985718 18 . S - 0{,}00000125701\ S^2$. Nach dieser Formel würde die Temperatur bei 5162 Fuß mit 40,7° R ihr Maximum erreichen und dann wieder abnehmen, so daß man für den Mittelpunkt der Erde eine große Kälte erhielte, was jedoch mit allem, was wir über die Abkühlung einer Kugel wissen, in direktem Widerspruch steht. Henrich beseitigte diesen offenbaren Mangel an der Dunkerschen Formel. Ferner machte er sie unabhängig von der mittleren Temperatur der Oberfläche, da von dieser die Temperaturzunahme gar nicht abhängig

Digitized by Google

ist. Seine Formel F=12,273+0,00744925 S ergibt eine mit wachsender Tiefe stetig zunehmende Temperatur und zwar auf 100 Fuß 0,76° R. Ferner stimmen die mit dieser Formel berechneten Werte viel besser mit den Beobachtungen überein. Hottenroth ist nur mit der Ausschaltung der mittleren Ortstemperatur aus der Dunkerschen Formel einverstanden, er bestreitet jedoch, daß es richtig ist, wenn Henrich für das Gesetz der Temperaturzunahme nach der Tiefe eine gerade Linie annimmt; nach seiner Meinung wird es durch eine Parabel dargestellt. Dunker hat später seine erste Formel selbst verworfen und spricht sich an verschiedenen Stellen seiner Arbeiten ganz entschieden dafür aus, daß die Wärme in den uns erreichbaren Tiefen wie die Tiefe zunehme, und daß man aus den geringen durch Beobachtungsfehler unvermeidlichen Verzögerungen keineswegs auf Wärmemangel im Erdmittelpunkt schließen dürfe. Die Sperenberger Beobachtungen ergeben nach seinen späteren Berechnungen als Wärmegesetz F=17,486492+0,007450129 (S—700). Brauns und Lasaulx sind der Ansicht, daß die aus den Sperenberger Beobachtungen gezogenen theoretischen Schlüsse für größere Tiefe durchaus keine Gültigkeit haben. Die in Sperenberg gefundenen Temperaturen seien nicht die wirklichen Gesteinstemperaturen, sondern trotz des Abschlusses mit dem Dunkerschen Kautschukverschluß habe von unten her eine Erwärmung stattgefunden. Hann fand auf Grund der für die Erde geltenden Gesetze der Wärmeleitung und -strahlung, daß zwar mit wachsender Tiefe die geothermische Tiefenstufe wächst, daß wir aber die Zunahme erst in einer Tiefe von 130000 engl. Fuß merken können, wenn seit Beginn der Abkühlung der Erde 100 Millionen Jahre verflossen sind und in 13000 Fuß (etwa 4 km) bei einer Abkühlungsdauer von 1 Million Jahren. Pfaff versuchte auf experimentelle Weise das Gesetz der Temperaturzunahme zu finden, da die Beobachtungen an der Erde selbst gar zu verschiedene Werte ergeben haben. Die Bischofschen Versuche hält er wegen des geringen Kugeldurchmessers für unzureichend und den tatsächlichen Verhältnissen zu wenig nahe kommend. Er geht dabei von folgender Ueberlegung aus: „Denken wir uns die Erdrinde 10 geographische Meilen dick, so ist, wenn wir uns ein beliebiges Stück der Erde an der Oberfläche mit einer kreisförmigen Basis als Kegel bis in den Mittelpunkt der Erde verlängert denken, der feste Teil dieses Kegels, das Rindenstück, sofern wir den Kegel sehr spitz annehmen, den Durchmesser der Basis z. B. eine Meile also 15 Minuten umfassend, unbedingt als ein Zylinder anzusehen, der mit seiner Grundfläche auf einer erhitzten Masse aufsteht und seitlich gegen Wärmeverlust geschützt ist." Auf Grund dieser Betrachtung verfuhr er folgendermaßen: Er füllte einen Blechzylinder, der mit seitlichen Oeffnungen zur Aufnahme der Thermometer versehen war, mit Quarzsand. Diesen Zylinder steckte er in einen Pappzylinder und füllte den Zwischenraum mit Sägespänen aus zur besseren Wärmeisolierung. Das Ganze wurde anfangs in einem Wasser- und später in einem Oelbad erhitzt, bis die Thermometer eine konstante Temperatur zeigten. Aus den Beobachtungen zieht Pfaff den Schluß, daß die Temperaturzunahme mit der Tiefe nicht in einer arithmetischen, sondern in einer geometrischen Reihe erfolge. Diese Experimente entfernen sich so weit von den tatsächlichen Verhältnissen, daß man ihnen irgendwelche Bedeutung zur Lösung des vorliegenden Problems nicht zusprechen kann. Ueberblickt man das Ergebnis aller Versuche, ein Gesetz für die Wärmezunahme nach dem Erdinnern aufzustellen, so ergibt sich, daß die neuesten mit allen Vorsichtsmaßregeln an der Erde gemachten Beobachtungen eine der Tiefe proportionale Temperaturzunahme ergeben und nicht wie die früheren Beobachtungen eine langsamere. Dies gilt jedoch nur für die uns erreichbaren Tiefen; in größeren Tiefen wird nach den theoretischen Berechnungen von Thomson und Hann sowie nach den Experimenten von Bischof die Temperatur langsamer zunehmen als die Tiefe.

5. Ursachen der Erdwärme. Wir haben in den vorigen Kapiteln gesehen, daß unsere Erde im Innern eine von der jetzigen Sonnenstrahlung unabhängige Wärmequelle besitzen muß. Wir wollen uns nun mit den Ursachen dieser inneren Erdwärme näher beschäftigen. Descartes (1644) und Leibnitz (1649) sprachen zuerst die Ansicht aus, die Erde sei einst eine feurig-flüssige Masse gewesen und die innere Erdwärme sei noch ein Rest jener sehr großen Hitze. Auch Fourier bekennt sich in seinem grundlegenden Werk: „Théorie analytique de la chaleur" zu der Ansicht, daß die innere Erdwärme ein Rest der ursprünglichen Ballungswärme sei. In ganz eigenartiger Weise versucht Poisson die innere Erdwärme zu erklären. Er nahm Anstoß daran, daß die Mehrzahl der Physiker und Geologen für das Erdinnere eine unsere menschlichen Begriffe weit übersteigende Temperatur annehmen. Bei einer Temperaturzunahme von 1° C für 30 m würde die Mittelpunktstemperatur über 2 Millionen Grad betragen. Es müßten daher alle Stoffe als glühende Gase vorhanden sein, die jedoch auf die fünffache Dichte des Wassers komprimiert wären. Poisson hält es für unmöglich, daß die Erdkruste imstande sei, einem Druck, wie ihn derartig stark komprimierte Gase ausüben müßten, zu widerstehen. Er sucht infolgedessen eine andere Erklärung für die innere Erdwärme. Aus der kugelförmigen an den Polen abgeplatteten Gestalt

Digitized by Google

schließt er auf einstige Flüssigkeit der ganzen Erdmasse, die sich durch Wärmeabgabe an den kalten Weltenraum abkühlte. Die Erstarrung begann nicht, wie allgemein angenommen wird, an der Oberfläche, sondern im Mittelpunkt, da die zentralen Schichten infolge des hohen Drucks schon bei Temperaturen erstarren konnten, bei denen die äußeren noch lange flüssig sind. Nachdem die Erde vollständig erstarrt war und ihre ganze Wärme verloren hatte, kam unser Planetensystem in wärmere Gegenden des Weltenraumes und die Erde wurde von außen wieder erwärmt. Augenblicklich passiert sie wieder kältere Regionen und so findet man nach dem Erdinnern eine Temperaturzunahme, ohne daß man eine allzu hohe unsere Begriffe übersteigende Temperatur annehmen müßte. Die Ansicht von der verschiedenen Temperatur des Weltenraumes ist insofern unrichtig, als er leer ist und infolgedessen auch keine Temperaturunterschiede aufweisen kann. Im großen und ganzen zustimmend sprach sich Lamont zu Poissons Hypothese aus; es fehlt aber auch nicht an direkten Gegnern. De la Rive gibt zwar zu, daß das Erdinnere nicht unbedingt flüssig sein müsse, um die Temperaturzunahme zu erklären, jedoch hält er es für nötig, eine eigene Wärmequelle im Innern der Erde anzunehmen. Er glaubt, daß chemische Prozesse die Ursache der inneren Erdwärme seien. Poggendorff wendet sich besonders gegen die Annahme, daß die Erstarrung vom Zentrum aus begonnen haben soll. Er hält es für unmöglich, daß eine Flüssigkeit bei hoher Temperatur durch Druck verfestigt werden könne, zumal wenn sie sich bei ihrer Erstarrung ausdehnt. Gerade wenn man ein flüssiges Innere voraussetzt, braucht man nicht so unglaublich hohe Temperaturen anzunehmen, da die Temperatur innerhalb der flüssigen Massen infolge von Strömungen fast überall gleich sein wird. Auch Naumann ist der Ansicht, daß die Erstarrung von der Oberfläche her begann und nicht im Zentrum. Ebenso wenig ließe sich die Verschiedenheit der Temperatur des Weltraumes beweisen. Thomson leugnet zwar nicht, daß man die Temperaturverhältnisse des Erdinnern durch chemische Prozesse erklären kann; jedoch sei diese Art der Erklärung infolge der überall gleichmäßig beobachteten Temperaturzunahme sehr unwahrscheinlich. Die weniger hypothetische Ansicht, die Erde sei ein chemisch untätiger, in der Abkühlung begriffener warmer Körper, sei jedenfalls vorzuziehen. Poissons Hypothese sei schon aus dem Grunde unhaltbar, weil beim Passieren der heißen Regionen des Weltenraumes die Entwicklung der Tier- und Pflanzenwelt eine Unterbrechung erlitten hätte. Wäre nämlich dieser Durchgang vor mehr als 1250 und weniger als 5000 Jahren erfolgt, so müßte die Temperatur jener Regionen 25 bis 50° F höher gewesen sein, als die mittlere heutige Oberflächentemperatur, eine Annahme, die durch die Geschichte widerlegt wird. Wäre dagegen der Durchgang vor 20000 oder noch mehr Jahren erfolgt, so müßte die Temperatur sogar mindestens 100° F höher gewesen sein als die jetzige Oberflächentemperatur, dann wären aber alle Lebewesen zugrunde gegangen. Der Amerikaner Sterry Hunt sucht die Erdwärme gleichfalls auf chemischem Wege zu erklären. Er geht von einer rotierenden Nebelmasse aus, die eine so hohe Temperatur hatte, daß alle Stoffe gasförmig waren. Bei der Abkühlung trat eine Zirkulation ein, die Kugel wurde flüssig und nun bildeten sich die ersten chemischen Verbindungen, die nach Hunts Ansicht Oxyde von Silicium, Aluminium, Calcium, Magnesium und Eisen waren. Die Erstarrung begann im Zentrum, während die Oberfläche noch flüssig war. Bei weiterer Abkühlung bildete sich an der Oberfläche ein Brei, ähnlich den Hochofenschlacken oder vulkanischen Gläsern. Als dann die Temperatur so weit gesunken war, daß die Oberfläche dieses Breies erstarrte, kondensierte sich auch bald der Wasserdampf, und zwar infolge des größeren Druckes schon bei einer viel höheren Temperatur. Da das erste Wasser große Mengen Schwefel- und Salzsäure absorbiert hatte, wurde sofort ein großer Teil der soeben erst gebildeten Kruste zerstört. Ebenso begann die in großen Mengen vorhandene Kohlensäure auf die Gesteine einzuwirken. Die Erdoberfläche bestand aus Schichten, die aus dem Schmelzfluß erstarrt, dann aber durch chemische Einflüsse verändert waren. Je dicker die Kruste wurde, um so mehr kommen die untersten mit Wasser durchtränkten Schichten in den Bereich der inneren Hitze und um so größer war der darauf lastende Druck. Sie wurden dadurch in den wässerigen Schmelzfluß gebracht und liefern das Material für die Vulkanausbrüche. Toula bemerkt zu dieser Hypothese, daß zwar das Vorhandensein chemischer Prozesse in der Erde nicht zu leugnen sei, daß ihm aber der von Hunt eingeschlagene Weg höchst zweifelhaft sei. Vor allen Dingen ist nicht einzusehen, warum die einsinkenden Sedimente durch die innere Erdwärme schmelzen sollen, während die in jenen und noch größeren Tiefen befindlichen Massen sich im festen und nicht im flüssigen Zustand befinden sollen. Auch der Ursprung der gewaltigen Sedimentmassen und die Kräfte, welche das Sinken dieser Massen bewirken, sind keineswegs nachgewiesen. Volger gibt zwar eine im Erdinnern befindliche von der Sonne unabhängige Wärmequelle zu, jedoch macht er sich eine von den gewöhnlichen Anschauungen vollständig abweichende Vorstellung. Er führt die innere Erdwärme

Digitized by Google

auf drei Ursachen zurück: 1. Den Druck der oberen Schichten auf die unteren. 2. Die Reibung bei der Bewegung der festen Teile und des Wassers innerhalb der Erde. 3. Chemische durch die Atmosphärilien hervorgebrachte Vorgänge. In ähnlicher Weise führt Mohr die innere Erdwärme auf umgesetzte Sonnenarbeit zurück. Das von der Sonne auf der Erdoberfläche verdampfte Wasser fällt als destilliertes aus den Wolken hernieder, dringt in die Erde ein und kommt, nachdem es feste Bestandteile aus der Erde aufgenommen hat, wieder an die Oberfläche. Durch dieses Auswaschen entstehen in der Erdoberfläche Hohlräume, infolge deren Senkungserscheinungen auftreten, welche die innere Erdwärme hervorbringen sollen. Pfaff hat eingehend nachgewiesen, daß die von Volger und Mohr angenommenen Wärmequellen nicht im entferntesten ausreichen, sondern daß wir vorläufig die innere Erdwärme nur als Rest der einstigen Ballungswärme erklären können. Trotzdem alle Beobachtungen dagegen sprechen, daß das Erdinnere seine Wärme von außen empfange, hat doch Treubert die Ansicht ausgesprochen, die Sonne sei die Ursache der inneren Erdwärme, indem sie wie die Luft so auch das Innere erwärme. Die Erdrinde sei viele Meilen für Luft und Wasser durchlässig und stehe mit der Atmosphäre durch viele Kanäle in Verbindung. Nach Treuberts Ansicht müßten in dieser „Gesamtatmosphäre" die gleichen Vorgänge stattfinden wie in der Atmosphäre, d. h. die Temperatur müßte mit der Tiefe zu- und mit der Höhe abnehmen. Küppers bemerkt dazu sehr richtig, daß ein großer Unterschied zwischen „Gesamtatmosphäre" und Atmosphäre besteht in Bezug auf die Lage der Wärmequelle. Für erstere liegt sie oberhalb, für letztere dagegen unterhalb der erwärmten Luftmassen. Dieser Unterschied dürfte doch auf die Wärmezirkulation einen so großen Einfluß haben, daß dadurch Treuberts Hypothese jede Existenzberechtigung verliert. Die von Treubert angenommenen Zirkulationen der Bodenluft verlangen eine Wärmequelle im Innern der Erde, und er gibt uns so selbst das Mittel in die Hand, die Unzulänglichkeit seiner Hypothese zu beweisen. Ebenfalls auf die Sonne, wenn auch in anderer Weise, sucht Jaczewski die Erdwärme zurückzuführen. Nach seiner Meinung müßte man überall dieselbe geothermische Tiefenstufe finden, trotz der verschiedenen Wärmeleitungsfähigkeit der Gesteine, wenn die Ursache dieser Wärme in den zentralen Partien der Erde zu suchen wäre. Es müßte sich zwischen der von außen zugeführten Sonnenwärme und der inneren ein stationärer Zustand bilden, sodaß sich jenseits der neutralen Schicht überall dieselbe geothermische Tiefenstufe ergäbe. Da nun die geothermische Tiefenstufe nicht überall gleich groß gefunden worden ist, so schließt Jaczewski, daß die Ursache der Temperaturzunahme eine andere sei, als die bisher angenommene. Nach seiner Ansicht genügen auch die chemischen Prozesse nicht, um die Verschiedenheiten zu erklären. Diese Gründe erscheinen mir nicht hinreichend, die zentrale Erdwärme zu leugnen. Abgesehen davon, daß Jaczewski die durch die chemischen Prozesse entstandene Wärme zu gering anschlägt, vergißt er ganz den Einfluß der in der Erdrinde zirkulierenden Wassermassen, die teils erwärmend, teils abkühlend wirken, ebenso wie den der Vulkane und der unterirdisch erstarrenden Magmen. Ferner ist auch die Wärmeleitfähigkeit nicht zu vernachlässigen, da die Werte für die in der Erde vorhandenen Stoffe ziemlich voneinander abweichen (siehe Seite 726). Jaczewski versucht dann eine neue Theorie über die Entstehung der Erde aufzustellen, mit deren Hilfe er gleichzeitig den Beweis zu erbringen sucht, daß das Erdinnere kalt sei und daß daher die Temperaturzunahme nur von der durch die Sonne zugeführten Wärme abhängen könne. Die Temperatur des Weltraumes sei eine sehr niedrige und auch der über den ganzen Weltraum zerstreute Stoff habe eine sehr niedrige Temperatur gehabt. Dagegen wäre nichts einzuwenden, wenn nicht Jaczewski glaubte, daß die Massen, die unsere Erde jetzt bilden, auch dann noch, als sie schon von der Sonne abgetrennt waren, die niedrige Temperatur des Weltenraumes gehabt hätten. Beim Zusammentritt der in Uratome aufgelösten Materie zu Atomen und Molekülen wurde eine beträchtliche Wärmemenge frei, die sich mit fortschreitender Verdichtung immer mehr steigern und, da wir es bei so hohen Temperaturen mit überkritischen Gasen zu tun haben, auch auf die ganze Masse gleichmäßig ausdehnen mußte. Von diesem heißen Zentralkörper trennten sich nun erst die einzelnen Planeten mit ihren Monden ab. Jaczewski nimmt dagegen an, daß sich der Kern der kalten unsere Erde bildenden Nebelmasse zuerst verdichtet habe und daß die dabei entstehende Wärme nach außen abgegeben worden sei. Mit fortschreitender Konzentration seien immer größere Wärmemengen nach außen abgegeben worden, und daher sei die Erde im Innern zuerst kalt und fest geworden. Die Gebirge seien dadurch entstanden, daß die Sonne in der festen Erdrinde ähnliche Strömungen der Massen hervorrufe, wie in den Meeren. Den Vulkanismus erklärt Jaczewski als Folge von stürmischen chemischen Reaktionen, die durch die Wirkung der Sonnenenergie hervorgebracht würden. Eine Kritik dieser Hypothese erübrigt sich nach dem eben Ausgeführten wohl von selbst. Eine ganz eigenartige Erklärung für die innere Erdwärme

Digitized by Google

sucht Liebenow zu geben, indem er das Radium als Ursache angibt. Wenn man die vom Innern abgegebene Wärmemenge 10^{10} Kilogrammkalorien setzt, so würden $2{,}10^{14}$ g Radium genügen, um die Temperatur der Erde konstant zu erhalten. Verteilt man diese Menge gleichmäßig auf die ganze Erde, so kommen auf 1 cbm $^1/_{5000}$ mg, nur auf der Oberfläche verteilt kommen auf jeden qm 0,4 g, eine Radiummenge, die in einer 6 cm dicken Schicht Joachimsthaler Pechblende enthalten ist. Daher können in der Tiefe keine größeren Mengen Radium vorhanden sein oder wenigstens ist die Zersetzung nur auf eine geringe Oberflächenschicht beschränkt. Dann dürfte allerdings auch die Temperatur nur in der Nähe der Oberfläche zunehmen und jenseits jenes Gebietes würde das ganze Innere einen gleichen nicht allzu hohen Maximalwert besitzen. Es ist nicht zu bezweifeln, daß ein Teil, ja vielleicht sogar die ganze Wärme, die unsere Erde nach außen abgibt, durch die radioaktiven Elemente geliefert wird. Ich halte es jedoch für sehr unwahrscheinlich, daß die ganze innere Erdwärme durch das Radium geliefert wird. Wenn auch das Vorhandensein chemischer Prozesse im Erdinnern nicht zu leugnen ist, so sind sie allein nicht imstande, die gleichmäßige Temperaturzunahme und den Vulkanismus zu erklären. Wir können daher nicht auf die Annahme verzichten, daß die innere Erdwärme ein Rest der ursprünglichen Ballungswärme ist, da wir sie einerseits zur Erklärung der vulkanischen Erscheinungen nötig haben, und da sie sich andererseits auch aus der ganzen Entstehung unserer Erde mit Notwendigkeit ergibt.

Literatur. *S.* **Arrhenius**, *Das Werden der Welten. Deutsch von L. Bamberger. Leipzig 1908.* — **Bischof**, *Die Wärmelehre des Innern unseres Erdkörpers, ein Inbegriff aller mit der Wärme in Beziehung stehender Erscheinungen in und auf der Erde. Leipzig 1837.* — **Cordier**, *Neue Beobachtungen über die Temperatur im Innern der Erde. Poggendorffs Annalen, LXXXIIX (XIII, N. F.), 1828, S. 363 bis 366.* — *E.* **Dunker**, *Ueber die Benutzung tiefer Bohrlöcher zur Ermittelung der Temperatur des Erdkörpers und die deshalb in dem Bohrloche I zu Sperenberg auf Steinsalz angestellten Beobachtungen. Zeitschrift für Berg-, Hütten- und Salinenwesen in dem Preußischen Staate, 1872, S. 206.* — **Derselbe**, *Ueber die Temperaturbeobachtungen im Bohrloche zu Schladebach. Neues Jahrbuch für Mineralogie, Geologie und Paläontologie, 1889, I, S. 29 bis 47.* — **Fourier**, *Théorie analytique de la chaleur. Deutsch von Weinstein, S. 9. Berlin 1884.* — **Günther**, *Handbuch der Geophysik. 2. Aufl. 1. Stuttgart 1897.* — **Hann**, *Handbuch der Klimatologie. 1883.* — **Jaczewski**, *Ueber das thermische Regime der Erdoberfläche im Zusammenhang mit den geologischen Prozessen. Verhandlungen der Kaiserl. Russ. Mineralogischen Gesellschaft, XLII, 1905, S. 243 bis 383.* — *A.* **Kircher**, *Mundus subterraneus. Amsterdam 1665.* — **Kupffer**, *Bemerkungen über die Temperatur in den tieferen Erdschichten. Poggendorffs Annalen, CVIII (XXXII, N. F.), 1834, S. 284 bis 288.* — **Liebenow**, *Notiz über die Radiummenge der Erde. Physikalische Zeitschrift, 1904, V, S. 625, 626.* — **Magnus**, *Beschreibung eines Maximumthermometers und einiger damit angestellten Versuche in einem Bohrloche zu Rüdersdorf. Poggendorffs Annalen, XCVIII (XXII, N. F.), 1831, S. 136 bis 150.* — **Mandelsloh**, *Beobachtungen über die Zunahme der Erdwärme in dem 1186 württembergische Fuß tiefen Bohrloche zu Neuffen, angestellt mit dem Magnusschen Geothermometer. Neues Jahrbuch für Mineralogie, Geognosie, Geologie und Petrefaktenkunde, 1844, S. 440 bis 443.* — **Naumann**, *Lehrbuch der Geognosie, 2. Aufl., I. Leipzig 1858.* — **Poisson**, *Théorie mathématique de la chaleur. Auszug deutsch: Von den Ursachen der Temperatur des Erdballs. Poggendorffs Annalen, CXV (XXXIX, N. F.), 1836, S. 66 bis 100.* — **Reich**, *Beobachtungen über die Temperatur des Gesteins in verschiedenen Tiefen in den Gruben des sächsischen Erzgebirges in den Jahren 1830 bis 1832. Freiberg 1834.* — **Stapff**, *Wärmezunahme nach dem Innern von Hochgebirgen. Bern 1880.* — **Derselbe**, *Drei Vorträge, gehalten in der 55. Versammlung Deutscher Naturforscher und Aerzte zu Eisenach 1882.* — *H.* **Thiene**, *Temperatur und Zustand des Erdinnern. Jena 1907.* — **Thomson und Tait**, *Handbuch der theoretischen Physik. Deutsch von Helmholtz und Wertheim, I₂. Braunschweig 1874.*

H. Thiene.

Erlenmeyer
Emil.

Geboren am 28. Juni 1825 zu Wehen bei Wiesbaden, starb er am 22. Januar 1909 in Aschaffenburg, wo er seit 1893 im Ruhestand lebte, nachdem er seine erfolgreiche Lehrtätigkeit in Heidelberg 1855 begonnen, dann seit 1868 an der Technischen Hochschule in München bis zum Jahre 1883 ausgeübt hatte. Er ist als Schriftsteller ungemein tätig gewesen, nicht nur durch Veröffentlichung seiner ausgezeichneten Experimentaluntersuchungen, die meist Gegenstände der organischen Chemie behandelten, sondern auch durch Herausgabe eines größeren Lehrbuches der organischen Chemie (seit 1864), in dem er die damals neue Strukturlehre mit Erfolg durchführte und so zu deren Einbürgerung beitrug. Seine gesunde, kritische Natur kam hier wie schon früher in seinen theoretischen Aufsätzen, die er in der von ihm herausgegebenen „Zeitschrift für Chemie und Pharmazie“ in Zeiten des Sturmes und Dranges chemischer Entwickelung (1859 bis 1864) veröffentlichte, zu voller Geltung. Das Wirken Erlenmeyers auf diesem Gebiete wie als Forscher und als Lehrer ist in dem von seinem Schüler M. Conrad geschriebenen Nekrolog (Ber. 43, 3654) eingehend dargelegt.

E. von Meyer.

Digitized by Google

Erosion

nennt man die eingrabende Tätigkeit des Wassers, Eises und Windes (vgl. die Artikel „Meere“, „Flüsse“, „Eis“, „Atmosphäre“).

Eruptivgesteine

heißen alle Gesteine, welche aus dem Schmelzfluß entstanden sind. Synonymum: vulkanische Gesteine. Man vergleiche die Artikel „Lagerungsform der Gesteine“ und „Gesteinseinteilung“.

Erzlagerstätten.

1. Einleitung. 2. Die wichtigsten auf den Erzlagerstätten vorkommenden Mineralien: a) Erze von Gold, Silber, Quecksilber, Platinmetallen, Kupfer, Blei, Zink, Zinn, Eisen, Mangan, Chrom, Aluminium, Nickel, Kobalt, Antimon, Wismut, Arsen, Molybdän, Wolfram, Uran, Lithium, Schwefel, Phosphorit. b) Lagerarten und Gangarten. 3. Allgemeine geologische Verhältnisse: a) Unterscheidung nach der Form. b) Lage im Raum. 4. Sekundäre Veränderungen der Mineralführung. 5. Systematik. 6. Entstehung der Erzlagerstätten und damit zusammenhängende besondere Eigenschaften: a) Magmatische Ausscheidungen. b) Schichtige Lagerstätten. c) Erzgänge. Entstehung der Spalten. Die Gangfüllung. Gangstruktur. Paragenesis. Unregelmäßigkeit der Erzführung. d) Höhlenfüllungen und metasomatische Lagerstätten. e) Kontaktlagerstätten. f) Die eluvialen Lagerstätten. g) Die alluvialen Seifen. 7. Beziehungen der Erzlagerstätten zum Magma. 8. Die wichtigsten Lagerstätten in ihrer geographischen Verbreitung: Gold, Silber, Quecksilber, Platin, Kupfer, Blei, Zink, Zinn, Wolfram, Eisen, Mangan, Chrom, Aluminium, Nickel, Kobalt, Antimon, Wismut, Schwefel, Phosphorit.

1. Einleitung. Als Erz bezeichnet der Bergmann im allgemeinen Mineralien, aber auch Mineralgemenge, welche für die Darstellung von Schwermetallen oder ihrer Verbindungen in Betracht kommen können. In diesem Sinne besteht ein Erz fast niemals aus Schwermetallen oder Schwermetallverbindungen allein, sondern diese sind meistens vermengt mit mehr oder weniger massenhaften wertlosen Begleitern, den Gang- (oder Lager-)Arten; außer manchen anderen technischen Gesichtspunkten entscheidet der Wert des zu gewinnenden Metalles darüber, ob das Gemenge als Erz bezeichnet werden kann oder nicht. So kann eine Quarzmasse mit einer Beimengung von nur 0,0005% Gold in sehr vielen Fällen noch als Golderz gelten, während ein eisenhaltiges Gemenge mit 30% Eisengehalt nur unter ganz besonderen Verhältnissen noch als Eisenerz betrachtet werden kann. Uebrigens werden gelegentlich auch solche Schwermetallverbindungen als Erze bezeichnet, die nicht wegen des Metalles sondern wegen ihres wertvollen Gehaltes an Schwefel oder Arsen usw. gewonnen werden, so der Schwefelkies, der Arsenkies, und in früherer Zeit galt dies auch für die sauerstoffreichen Manganerze.

In den Erzlagerstätten haben die in kleinen Mengen durch die ganze Gesteinswelt verbreiteten Metalle durch mannigfache Vorgänge eine Konzentration erfahren.

2. Die wichtigsten auf den Erzlagerstätten vorkommenden Mineralien. Im folgenden mögen die wichtigsten auf den Erzlagerstätten auftretenden („einbrechenden“) Mineralien, Erze wie Gangarten aufgezählt werden. Es geschehe dies unter Bezeichnung ihrer besonderen Art des Vorkommens, ihrer Bildung und Umwandlung, während wegen der besonderen Eigenschaften der zu erwähnenden Mineralien auf die mineralogischen Lehrbücher und die entsprechenden Artikel des Handwörterbuchs verwiesen werden muß.

2a) Erze. — Gold. Gold ist ein zwar sehr untergeordneter aber oft wertvoller Bestandteil vieler Sulfide, wie des Schwefelkieses, des Kupferkieses, der edlen Silbererze, des Fahlerzes und des Arsenkieses, sowie manchmal des Arseneisens. In welchem Zustand sich das Edelmetall in diesen Erzen befindet, ob in gediegenem Zustand fein eingesprengt, oder wie dies oft sehr wahrscheinlich ist, in isomorpher Mischung oder Lösung, läßt sich bisher mit Sicherheit nicht feststellen. Durch Verwitterung der genannten Erze wird das Gold frei und erfährt dabei sehr oft eine sekundäre Konzentration als Freigold.

Das gediegene Gold ist neben dem goldhältigen („güldischen“) Schwefelkies das wichtigste Golderz. Man unterscheidet das Berggold vom Seifengold; ersteres wird zu letzterem, wenn es durch natürliche Transportmittel (Wasser, Wind) aus den primären Lagerstätten verschleppt wird. Das Berggold soll im allgemeinen einen höheren Silbergehalt als Seifengold besitzen; er kann z. B. auf den Goldsilbererzgängen Siebenbürgens $^4/_{10}$ der Legierung ausmachen. Die größere Reinheit des Seifengoldes wird einerseits dadurch begründet, daß das auf den alluvialen Lagerstätten vorkommende Gold teilweise von sekundären, bereits silberarmen Goldkonzentrationen in den verwitternden Lagerstätten herrührt, andererseits nimmt man auch an, daß infolge der langandauernden Einwirkung der Atmosphärilien in den Seifenablagerungen eine Auslaugung der unedleren Beimengungen, also eine natürliche Läuterung des Goldes statthat.

Auf gewissen Golderzgängen bilden die

itized by Google

zinnweißen Tellurgolderze ein sehr wichtiges Erz. Die Zusammensetzung dieser Erze entspricht allgemein der Formel (Au, Ag)Te_2, d. h. das Verhältnis zwischen Gold und Silber ist ein sehr schwankendes; so enthält der Sylvanit von Nagyág in Siebenbürgen 30% Au und 10% Ag, in dem fast silberfreien Calaverit Kaliforniens sind 44% Au, im Krennerit etwa 35% Au auf 6% Ag enthalten. Der gleichfalls zu Nagyág auftretende bleigraue Nagyagit (Blättertellur) ist im wesentlichen ein Bleitellurid mit einem Goldgehalt von 6—13%. Sehr selten ist das Tellurgoldsilber (Petzit $(Ag, Au)_2$ Te) mit 24 bis 26% Au.

Silber. Das meiste Silber wird aus dem Bleiglanz gewonnen, der fast immer einen, allerdings sehr selten bis zu 1% sich erhebenden Silbergehalt besitzt. Von den edlen Silbererzen ist das manchmal goldhaltige gediegene Silber in den mannigfachsten Formen (in Drähten, Zähnen, Filigranen, Kristallen usw.), insbesondere als ein Verwitterungsprodukt auf silberhaltigen Bleiglanzlagerstätten oder entstanden durch die Umwandlung anderer Silbererze sehr verbreitet. Wichtig ist ferner der dunkelgrau metallisch glänzende regulär kristallisierende Silberglanz (Ag_2S, mit 87,07% Ag), sehr selten das ähnlich aussehende Tellursilber (Hessit Ag_2Te). Auf den Andreasberger Gängen hatte das zinnweiße Antimonsilber (mit etwa 75% Ag) eine gewisse Bedeutung. Sehr verbreitet sind die rotdurchsichtigen Rotgültigerze, nämlich der Proustit (Ag_3AsS_3 mit 65,4% Ag und der Pyrargyrit (Ag_3SbS_3 mit 60% Ag), der letztere weit häufiger als ersterer. Die prächtigen rhomboedrisch-hemimorphen Kristalle dieser Erze finden sich u. a. auf den Silbererzgängen von Andreasberg, im Erzgebirge, in Chile, Peru und Bolivien usw. Von anderen rotdurchsichtigen Silbererzen seien genannt die Feuerblende (Ag_3SbS_3, wie Pyrargyrit, aber monoklin), der Xanthokon (Ag_3AsS_3, gleichfalls monoklin) und der monokline Miargyrit $AgSbS_2$; letztere drei sind selten und niemals als Silbererze von eigentlicher Bedeutung. Schöne, eisenschwarz glänzende rhombische Kristalle bildet nicht selten in Begleitung des Rotgültigerzes der Stephanit (Melanglanz, Sprödglaserz, Ag_5SbS_4, mit 68,5% Ag); seltener ist der Polybasit (etwa $Ag_{10}Sb_2S_8$, eines der reichsten Silbererze mit ca. 70% Ag). Ein sehr seltenes silberreiches Germaniummineral ist der Argyrodit von Freiberg. Stark silberhaltig und dann als eigentliche Silbererze von Bedeutung, wie z. B. in Südamerika oder ehedem zu Freiberg, sind häufig gewisse Antimonfahlerze.

Wohl stets sekundärer Entstehung sind die regulär kristallisierenden Halogenverbindungen des Silbers, nämlich das Chlorsilber (Hornsilber, Kerargyrit, AgCl mit 75,3% Ag), das Bromsilber (AgBr), der Jodobromit (AgJ + 2 Ag[Cl, Br]), und das hexagonale Jodsilber (Jodargyrit, Ag J); weitaus das wichtigste ist das, in den Wüsten Chiles ehedem stellenweise massenhaft gefundene Chlorsilber.

Das wichtigste Quecksilbererz bildet der Zinnober, HgS mit 86,2% Hg, meistens derb, seltener in rhomboedrischen Kristallen. Er wird oft von gediegenem Quecksilber, wohl auch von Silberamalgam begleitet. An manchen Orten, z. B. zu Kotterbach an der Tatra, wird Quecksilber auch aus quecksilberhaltigem Kupferfahlerz gewonnen, das bis zu 17% desselben enthalten kann.

Die Metalle der Platingruppe, Platin, Iridium, Osmium, Palladium, Rhodium und Ruthenium bilden in der Natur Legierungen, in welchen Platin, Iridium (im Osmiridium) und Osmium (im Iridosmium) die vorwaltenden Bestandteile ausmachen. Zu bemerken ist, daß sich auf den Golderzlagerstätten von Gongo Socco nördlich von Ouro Preto in Brasilien Gold mit einem Palladiumgehalt von 8% gefunden hat. Der Laurit, RuS_2, von Borneo und der Sperrylit, Pt As, von Sudbury in Kanada, haben nur mineralogisches Interesse.

Das wichtigste Kupfererz ist der goldgelbe, tetragonal kristallisierende Kupferkies ($FeCuS_2$, mit 34,5% Cu und 30,5% Fe). Massenhaft findet sich, mitunter als primäres Erz, das Kupferfahlerz [$(Cu_2,Fe,Zn)_4Sb_2S_7$ oder $(Cu_2,Fe,Zn)_4As_2S_7$ oder Mischungen beider mit einem Kupfergehalt bis zu 52%]. Diesem eisenschwarz metallisch glänzenden, tetraedrisch kristallisierenden Erz ist ähnlich der wenig häufige rhombische Enargit (Cu_3AsS_4). Alle übrigen Kupfererze sind gewöhnlich oder ausschließlich aus der Verwitterung der vorigen, besonders des Kupferkieses hervorgegangen: das im frischen Bruche bronzefarbige Buntkupfererz ($FeCu_3S_3$, mit 55,6% Cu) der indigoblaue Covellin (Kupferindig, CuS, mit 66,4% Cu), der eisenschwarz glänzende, nicht selten in rhombischen Kristallen auftretende Kupferglanz (Cu_2S, mit 79,8% Cu), das reguläre Rotkupfererz (Cu_2O, mit 88,8% Cu) und das gediegene Kupfer; desgleichen die blauen oder grünen Kupfersalze, wie der Malachit ($[CuOH]_2CO_3$), die Kupferlasur ($[CuOH]_2Cu[CO_3]_2$); gelegentliche Kupferarseniate und -Phosphate, das Kieselkupfer ($CuSiO_3 . 2H_2O$) und seine mit Brauneisenerz verunreinigte Abart, das Kupferpecherz. Der in schönen rhomboedrischen Kristallen auftretende Dioptas, H_2CuSiO_4 ist selten, der in Wasser leicht lösliche Kupfervitriol, $CuSO_4 . 5 H_2O$, hat nur in regenarmen Gebieten (z. B. in der Wüste Atacama) Bedeutung als Kupfererz.

Digitized by Google

Das gewöhnlichste Bleierz und eines der häufigsten Erze überhaupt ist der Bleiglanz (PbS, mit 86,6% Pb, wohl stets silberhaltig); er ist bleigrau, ein ausgezeichnetes Beispiel regulärer Kristallisation. Als Bleischweif bezeichnet man striemig-faserigen Bleiglanz, der seine Struktur wohl stets einer Pressung und Gleitung zu verdanken haben dürfte. Bei der Verwitterung des Bleiglanzes entsteht vorzugsweise Weißbleierz (Cerussit, $PbCO_3$), viel seltener der gleichfalls rhombisch kristallisierende Anglesit (Bleivitriol $PbSO_4$), gelegentlich bilden sich auch die hexagonalen Erze Pyromorphit (Grünbleierz, $Pb_5(PO_4)_3Cl$) und Mimetesit ($Pb_5(AsO_4)_3Cl$); untergeordnete sekundäre Bleimineralien sind unter anderen das Gelbbleierz ($PbMoO_4$, tetragonal) und das sehr seltene, monokline Rotbleierz ($PbCrO_4$). Wenig verbreitet und nur selten wichtig als primäres Gangmineral sind der Bournonit ($PbCuSbS_3$) und einige andere Sulfosalze des Bleies.

Das verbreitetste Zinkerz ist die regulär-tetraedrisch kristallisierende Zinkblende (Blende, Sphalerit ZnS). Im reinen Zustande enthält sie 67% Zn; bei den meisten Blenden wird indessen der Zinkgehalt durch die Beimengung von Eisen, das bis 20% ausmachen kann und dessen reichliche Anwesenheit im allgemeinen an der dunklen Färbung der Blende erkannt wird, erheblich herabgedrückt. Viele Zinkblenden besitzen einen merklichen, bis zu 4% steigenden Cadmiumgehalt, der sich bei der Verwitterung in der Bildung des hochgelben CdS, des Greenockits, kundgibt. Weit seltener als die Blende ist die hexagonale Modifikation des ZnS, der in derben Aggregaten meistens nicht leicht von der Zinkblende unterscheidbare Würtzit.

Aus der Zinkblende gehen durch Verwitterung die „Galmeie" hervor, d. h. der rhomboedrische Zinkspat (Smithsonit $ZnCO_3$), das rhombisch-hemimorphe Kieselzinkerz (Calamin $(ZnOH)_2SiO_3$), die mit diesen gelegentlich vorkommende schneeweiße Zinkblüte ($Zn(OH)_2.(ZnOH)_2CO_3$) und der seltene Willemit (Zn_2SiO_4). Die Galmeie kommen fast ausschließlich dort vor, wo das Nebengestein der verwitternden Blendelagerstätten Kalkstein ist. Das rhomboedrische, in der Natur als Rotzinkerz auftretende Zinkoxyd (ZnO, mit einem bis zu 12% steigenden Mn_2O_3-Gehalt) und der Franklinit, ein Zinkeisenmanganspinell, bilden nur bei Franklin im Staate New Jersey mächtige bauwürdige Massen.

Das Zinn tritt in der Natur fast nur als Zinnerz (Zinnstein, Kassiterit, SnO_2) auf. Dieses braune, tetragonal kristallisierende Erz enthält nach der Formel 78,6% Sn, ist aber meistens durch Eisenoxyd und andere Oxyde etwas verunreinigt. Der Zinnkies ($FeCu_2SnS_4$) ist nur auf wenigen Zinnerzlagerstätten bekannt.

Das Eisen findet sich in der Natur hier und da in gediegenem Zustande unter Bedingungen, die bei mancher Aehnlichkeit mit dem Meteoreisen doch eine tellurische Herkunft sicher erscheinen lassen. Das einzige wirklich massenhaftere Eisenvorkommen ist dasjenige von Uifak (Ovifak) auf der Insel Disko an der Westküste von Grönland. Tatsächlich ist das dortige Eisen in früherer Zeit von den Eskimos zur Herstellung von Geräten benutzt worden.

Die wichtigsten Eisenerze sind der Magnetit, der Eisenglanz, das Brauneisenerz und der Spateisenstein.

Der eisenschwarze, metallischglänzende, meist in Oktaedern kristallisierende Magnetit (Fe_3O_4 mit 72,4% Fe) ist eines der wichtigsten Erze der Kontaktlagerstätten und bildet in den kristallinen Schiefern manchmal kolossale Lager; auf den Erzgängen tritt er nur ausnahmsweise auf. Seine Bildung vollzieht sich offenbar bei höheren Temperaturen, wie er denn auch in größeren Massen als Ausscheidung aus Eruptivgesteinen und zwar besonders kieselsäurearmen („basischen") bekannt ist. In letzterem Falle wird er gern von Titaneisen (Ilmenit, $mFe_2O_3+nFeTiO_3$) begleitet, dessen Titangehalt den Wert solcher Erze herabdrückt.

Der rhomboedrisch kristallisierende, gleichfalls eisenschwarze, metallisch glänzende, an seinem dunkelkirschroten Strich erkennbare Eisenglanz (Hämatit, Roteisenerz, roter Glaskopf, Eisenglimmer, Eisenrahm, Fe_2O_3 mit 70% Fe) geht häufig infolge Oxydation aus dem Magnetit hervor; er vermag neben diesem oder ohne ihn in derselben Weise Erzlager zu bilden und tritt gleichfalls, wenn auch seltener als vorherrschendes Erz der Kontaktlagerstätten auf. Auf Erzgängen ist er häufiger als jener und mitunter das einzige Erz solcher. Eisenglanz findet sich als Verwitterungsprodukt vieler eisenhaltiger Erze und Mineralien.

Im übrigen ist das Brauneisenerz (Limonit, brauner Glaskopf, $Fe_4O_9H_6 = 2Fe_2O_3.3H_2O$ oder $4FeOH_3-3H_2O$, mit 60% Fe) das gewöhnlichste und stabilste Umwandlungsprodukt aller der Verwitterung unterliegenden Eisenverbindungen. Dieses Hydroxyd ist außerordentlich verbreitet in vielen wichtigen Eisenerzlagern der känozoischen und mesozoischen Schichten und bildet den Hauptbestand der aus konzentrisch-schaligen Konkretionen bestehenden Eisenoolithe oder Eisenrogensteine. In den verwitterten Ausstrichzonen der Erzlagerstätten tritt das Brauneisenerz an die Stelle sonstiger Eisenerze und eisenhaltiger Gangarten und

Digitized by Google

verursacht die intensive Braunfärbung, die dazu führte, jene Ausstriche als den „eisernen Hut“ zu bezeichnen.

Der Siderit (Eisenspat, Spateisenstein, $FeCO_3$ mit 48,2% Fe) kristallisiert rhomboedrisch und besitzt im frischen Zustand eine lichtbraune Farbe, die durch Verwitterung sehr bald in die braune des Brauneisenerzes oder bei einigem Mangangehalt in eine braunschwarze oder schwarze übergeht. Trotz seines niedrigen Eisengehaltes bildet er ein wichtiges Erz, insbesondere wenn an Ort und Stelle genügend Brennmaterial vorhanden ist, um ihn vor dem Transport abzurösten, wobei der Rückstand etwa die Zusammensetzung des Magnetits annimmt. In früherer Zeit war der Siderit gegenüber anderen Eisenerzen bevorzugt, weil er fast durchgängig phosphorarm oder phosphorfrei ist. Als Sphärosiderit bezeichnet man knollen- und linsenförmige, sehr stark mit tonigem Material verunreinigte Konkretionen von Spateisenstein, wie sie insbesondere in den verschiedensten tonig entwickelten Schichten des Mesozoikums und des Tertiärs auftreten. Wenn sie mehr oder weniger zu Brauneisenstein verwittert sind, nennt man sie wohl auch Toneisensteine. Der Kohleneisenstein (black band), der in zahlreichen Kohlenrevieren früher als wichtiges Erz gefördert worden ist, ist ein durch kohlige Beimengungen verunreinigter, dazu gewöhnlich ziemlich phosphorhaltiger Spateisenstein.

Die Brauneisensteine, ganz besonders die in sedimentären Lagern angehäuften, also z. B. auch die Rasen- und Seeerze, sind mehr oder weniger reich an Phosphorsäure. Ein höherer Phosphorgehalt führt manchmal zum sichtbaren Auftreten von allerlei Eisenphosphaten, wie des blauen Vivianits ($Fe_3(PO_4)_2.8H_2O$), des gelben Kakoxns ($Fe_2(PO_4)_2.12H_2O$), des braunen Eleonorits, des grünen Kraurits usw.

Neben dem Brauneisenerz kommen in untergeordneter Menge noch andere Eisenhydroxyde vor, wie der Goethit (FeO_2H), der Gelbeisenstein ($Fe_2O_5H_4$) und der rote und deshalb dem Roteisenstein ähnliche Hydrohämatit (Turgit $Fe_4O_7H_2$).

Die beiden wichtigsten Eisensulfide, der Magnetkies (Fe_7S_8 bis $Fe_{11}S_{12}$, wahrscheinlich FeS) und der Schwefelkies (Pyrit, FeS_2) kommen als Eisenerze nur mittelbar in Betracht; wenn sie durch Röstung völlig ihres Schwefelgehaltes beraubt („totgeröstet“) sind, werden sie gelegentlich auf Eisen weiter verhüttet. Im übrigen bildet besonders der Pyrit das Hauptmaterial für die Herstellung der Schwefelsäure.

Die verbreitetsten Manganerze sind die als Braunstein bezeichneten Mangansuperoxyde und Oxyde. Die Zusammensetzung MnO_2 besitzt der nicht sehr häufige, mitunter in deutlichen tetragonalen Kristallen auftretende stahlgraue Polianit, ferner der strahlige oder faserige gleichfalls stahlgraue Pyrolusit (Grau- oder Weichmanganerz); jener Formel entspricht ein Gehalt von 63,2% Mn und 36,8% O. Der Psilomelan (schwarzer Glaskopf, Hartmanganerz) besteht zum größten Teil aus MnO_2, enthält aber daneben immer auch BaO, K_2O und andere Bestandteile, wie z. B. Li_2O. Aehnlich zusammengesetzt ist das leichte, poröse Wad. Der schwarze Manganit (MnO_2H) bildete auf den Manganerzgängen des Südharzes bei Ilfeld in mitunter prächtigen rhombischen Kristallen das Haupterz. Die beiden tetragonal kristallisierenden halbmetallisch glänzenden schwarzen Manganoxyde, der Hausmannit (Mn_3O_4) und der Braunit (Mn_2O_3) finden sich nicht nur auf Gängen, sondern sie treten vor allem auch massenhaft an mehreren Orten Mittelschwedens, gebunden an Kalksteineinlagerungen in den kristallinischen Schiefern auf. Der Rhodonit ($MnSiO_3$) kommt als Gangart auf manchen Erzgängen und gewissen Kontaktlagerstätten vor. Da er außerdem auch an der Zusammensetzung gewisser Schiefer beteiligt ist (z. B. in der Kulmformation) und leicht zu Braunstein verwittert, so kann er den Ausgangspunkt für die Entstehung von reicheren Manganerzlagern bilden.

Das Chrom erscheint in größerer Menge lediglich in der Form des regulär kristallisierenden, schwarzen Chromits (Chromeisenstein (Fe, Mg, Cr) $(Cr, Al, Fe)_2O_4$). Er bildet nur in sehr basischen, magnesiareichen Eruptivgesteinen, den Peridotiten, magmatische Ausscheidungen von mitunter großem Umfang.

Aluminium wird aus dem Kryolith ($3NaF.AlF_3$) und vor allem aus dem Bauxit gewonnen. Der letztere hat etwa die Zusammensetzung AlOOH, ist aber mehr oder weniger durch Brauneisen und andere Stoffe verunreinigt; er entsteht durch die tiefgehende Zersetzung der verschiedensten tonerdehaltigen Gesteine.

Die eigentlichen Sulfide, Arsenide und Antimonide des Nickels, wie der Millerit (Haar- oder Nickelkies, NiS), der Rotnickelkies (NiAs), der Chloanthit ($NiAs_2$), der Gersdorffit (NiAsS), der Ullmannit (NiSbS) usw. haben niemals eine größere Bedeutung für die Nickelgewinnung gehabt. Diese geht vielmehr von zwei Mineralien aus, nämlich dem mitunter reichlich nickelführenden Magnetkies und dem Garnierit und anderen ihm verwandten Mineralien. Der Magnetkies mancher an gabbroartige Gesteine gebundener Lagerstätten, wie z. B. zu Sudbury in Kanada, enthält oft einen meistens nur wenige Prozente ausmachenden Nickelgehalt, der gelegentlich

Digitized by Google

bei Anwesenheit des nickelreichen Nickelmagnetkieses bis zu 15% steigen kann. Es ist zweifellos, daß solche Magnetkiese samt dem mit ihnen auftretenden Kupferkies Aussonderungen aus dem Gabbromagma selbst sind. Als Garnierit, Schuchardtit, Pimelit, Nickelgymnit usw. werden grüne, mehr oder weniger nickeloxydreiche, teilweise auch tonerdehaltige, gewöhnlich erdige Magnesiumhydrosilikate bezeichnet, welche stellenweise, wie in Neukaledonien und zu Frankenstein in Schlesien massenhaft bei der Zersetzung von nickelhaltigem Serpentin entstehen. Garnierit bildet gegenwärtig das hauptsächlichste Nickelerz.

Kobalt, das zur Smaltefabrikation benötigt wird, stammt vorzugsweise aus dem Speiskobalt ($CoAs_2$) und aus dem Asbolan. In früherer Zeit, als die sogenannten Kobaltfahlbänder bei Snarum in Südnorwegen noch von erheblicher Bedeutung für die Blaufarbenindustrie waren, bildete der Kobaltglanz (CoAsS), wie der Speiskobalt ein zinnweißes, regulär kristallisierendes Erz — der erstere besonders gern in Pentagondodekaedern gleich dem Pyrit — ein sehr wichtiges Kobalterz. Der Asbolan (Erdkobalt, Kobaltmanganerz) erscheint in nierenförmigen, dem Wad nicht unähnlichen Massen, die hauptsächlich aus Brauneisen und MnO_2 bestehen und als Zersetzungsprodukt nicht nur auf kobalthaltigen Erzgängen auftreten, sondern auch in der Verwitterungskrume z. B. der nickelführenden Serpentine auf Neukaledonien so massenhaft angetroffen werden, daß sie heute ein sehr wichtiges Kobalterz darstellen. Das in diesen Asbolanen scheinbar durch Adsorption konzentrierte Kobaltoxyd bildete jedenfalls, wie das Nickelerz, einen spärlichen Bestandteil der zersetzten Serpentine.

Das hauptsächlichste Antimonerz ist der bleigraue in rhombischen Prismen kristallisierende Antimonit (Antimonglanz, Grauspießglanzerz, Sb_2S_3, mit 71,4% Sb). Selten ist das gediegene Antimon.

Wismuterze sind das auf vielen Zinnerzgängen verbreitete gediegene Wismut und der zinnweiße, in rhombischen Prismen wie der Antimonit kristallisierende Wismutglanz (Bismutit, Bi_2S_3, mit 81,2% Bi). Letzterer ist im allgemeinen selten, bildet aber zusammen mit dem aus ihm hervorgehenden Wismutocker (Bismit, Bi_2O_3, mit 89,66% Bi) zu Tasna und Chorolque in Bolivien die reichsten Wismutlagerstätten der Erde.

Das Arsen des Handels wird bei der Verhüttung der mannigfachen arsenhaltigen Erze (Fahlerze, Arsenkies FeAsS, Arseneisen oder Löllingit $FeAs_2$, Speiskobalt usw.) gewonnen. Zu Andreasberg im Harz hatte das Vorkommen von gediegen Arsen eine gewisse Bedeutung.

Für die Zwecke des Eisenindustrie sind der bleigraue Molybdänglanz (MoS_2) und vor allem der schwarzbraune, monokline Wolframit ($FeWO_4$ und $MnWO_4$ oder Mischungen beider, mit 76% WO_3) gesuchte Erze. Sie finden sich hauptsächlich auf den Zinnerzgängen oder solchen mit ganz ähnlicher mineralogischer Zusammensetzung.

Das Uranpecherz (Pechblende, etwa U_3O_8, aber mit erheblichem Bleigehalt) ist seit etwa 60 Jahren für die Fabrikation gefärbter Gläser, von Porzellanfarben und neuerdings auch wegen seines Radiumgehaltes gesucht. Die wichtigsten Lagerstätten dieses pechschwarzen, durch das außerordentlich hohe spezifische Gewicht 9 ausgezeichneten Minerales liegen bei Johanngeorgenstadt und Joachimsthal im Erzgebirge, wo es ebenso wie z. B. im Gilpin County (Colorado) an Silbererzgänge gebunden ist.

Lithiumpräparate werden hergestellt aus lithiumhaltigen Glimmern wie z. B. dem Zinnwaldit ($H_2K_2Li_2Al_4Si_6O_{18}F_4 + Fe_{12}Si_6O_{18}$), aus dem Spodumen ($LiAlSi_2O_6$) und dem Petalit ($LiAlSi_4O_{10}$), welche letztere beiden z. B. auf der Insel Utö bei Stockholm für diesen Zweck gewonnen werden.

Der rhombisch kristallisierende Schwefel findet sich als Bestandteil von gewissen jungtertiären Mergelablagerungen in verschiedenen Gegenden; am wichtigsten sind die sizilianischen Schwefellager. Die chemische Industrie benutzt hauptsächlich den Schwefelkies (FeS_2) zur Darstellung der Schwefelsäure.

Das einzige massenhaft auftretende Phosphat ist der Apatit ($Ca_5(PO_4)_3Cl$ oder $Ca_5(PO_4)_3F$). Durch ihre schönen hexagonalen Kristalle berühmte Fundstätten liegen in Südnorwegen und Ontario. Als Phosphorite bezeichnet man teils phosphatreiche Koprolithen oder fossile Knochen und Zähne, sobald sie massenhaft in den Schichten auftreten, vor allem aber unreine, mehr oder weniger kalkige, tonhaltige oder eisenschüssige Konkretionen oder Krustenbildungen über Kalksteinen oder geradezu in Phosphat umgewandelte Kalksteine. Diese sind alle durch eine sekundäre Konzentration der ursprünglich an organische Reste gebundenen Phosphorsäure entstanden und bestehen wenigstens teilweise aus Fluorapatit; im übrigen ist die mineralogische Konstitution besonders der konkretionären Phosphorite noch wenig genau bekannt.

2b) Lagerarten und Gangarten. Soweit die Erze lagerartig oder als Ausscheidungen aus Eruptivgesteinen vorkommen, werden sie von den normaler Komponenten der normalen Sedimente oder kristallinen Schiefer, welche man dann als „Lagerarten" bezeichnet, oder von gewissen normalen Bestandteilen der Eruptivgesteine begleitet. Auf den sogenannten Kontaktlagerstätten sind die in den metamorphen Kalksteinen verbreiteten Silikate, mitunter in sehr schöner Kristallisation, die Begleiter der Erze: so vor allem der mehr oder weniger eisenhaltige Granat (Melanit, Topazolith, Andradit, Aplom $Ca_3Fe_2Si_3O_{12}$, eisenhaltiger Grossular $Ca_3(AlFe)_2Si_3O_{12}$), der monokline Diopsid ($MgCaSi_2O_6$), Strahlstein ($(MgFe)_3CaSi_4O_{12}$), der tetragonale Vesuvian ($H_4Ca_{12}Al_6Si_{10}O_{43}$), der Epidot ($H_2Ca_4(AlFe)_6Si_6O_{26}$), Wollastonit ($CaSiO_3$), seltener der Ilvait ($H_2Ca_2Fe^{II}_4Fe^{II}_2Si_4O_{18}$) usw.

Digitized by Google

Ueberall verbreitet ist der Quarz (SiO_2), häufig der chemisch gleichartige Chalcedon. Der Quarz bildet in verschiedenen Abarten (Eisenkiesel, Amethyst, Milchquarz, Bergkristall usw.) überhaupt die wichtigste Gangart der Erzgänge; der wasserhaltige Opal findet sich gelegentlich (wie z. B. der durch Nickeloxyd grün gefärbte Prasopal) als sekundäres Produkt. Von den Karbonaten ist am verbreitetsten der Kalkspat (rhomboedrisches $CaCO_3$), weniger häufig sind die weiteren „Karbonspäte" der Kalkspatgruppe: Dolomit ($CaCO_3 . MgCO_3$), Braunspat ($CaCO_3 . (Mg,Fe,Mn)CO_3$), Ankerit ($CaCO_3 . FeCO_3$), Eisenspat (Siderit $FeCO_3$) und Manganspat (Rhodochrosit $MnCO_3$). Die rhombischen Karbonate der Aragonitreihe, Aragonit ($CaCO_3$), Strontianit ($SrCO_3$) und Witherit ($BaCO_3$) sind auf Erzgängen seltene Erscheinungen. Von den Sulfaten ist der sehr häufig in ausgezeichneten rhombischen Kristallen auftretende Schwerspat (Baryt $BaSO_4$) eine der wichtigsten Gangarten; selten sind der Anhydrit ($CaSO_4$) und der Coelestin ($SrSO_4$). Der Flußspat (CaF_2) findet sich fast nur auf Erzgängen, mitunter so massenhaft, daß er gewonnen wird.

Silikate sind auf Erzgängen im allgemeinen selten. Ziemlich verbreitet und hier und da massenhaft vorkommend ist der rosafarbige, fast stets derbe Rhodonit ($MnSiO_3$). Die Feldspäte Orthoklas ($KAlSi_3O_8$) und Albit ($NaAlSi_3O_8$) werden nur gelegentlich beobachtet. Von Bedeutung sind gewisse bor-, fluor- und lithiumhaltige Silikate für die Zinnerzgänge, so vor allem der Turmalin (meistens der schwarze Schörl, $Si_{12}B_6Al_{16}(MgFe)_{12}H_6O_{63}$), der Topas ($Al_2SiO_4(F,OH)_2$) und der Zinnwaldit (ein Lithionglimmer). Die Zeolithe, das sind wasserhaltige Alumosilikate von Calcium, Natrium, seltener auch von Kalium, Baryum (Strontium) brechen nur auf gewissen, besonders auf silberhaltigen Erzgängen in größerer Menge ein, so z. B. zu St. Andreasberg. Der Apatit ($Ca_5(PO_4)_3(F,Cl)$) findet sich unter anderem auf manchen Zinnerzgängen.

3. Allgemeine geologische Verhältnisse.

3a) Unterscheidung nach der Form. Eine Systematik der Erzlagerstätten muß zwar, wenn sie wissenschaftlich befriedigen soll, stets auf deren Entstehungsweise begründet werden. Da aber die Erkenntnis der letzteren mitunter sehr schwierig und sogar bei vielen im übrigen gut bekannten Lagerstätten die Entstehungsweise noch Gegenstand der Erörterung ist, so ist es sehr gebräuchlich, allgemein die Form der Lagerstätten als Unterscheidungsprinzip zu benutzen. Manche der dabei gebrauchten Bezeichnungen umschließen bereits eine genetische Deutung.

Flöze sind über große Flächen hin verfolgbare Schichten, welche einen nutzbaren Bestandteil enthalten oder aus einem solchen bestehen, also z. B. Kohlenflöze, oder das Mansfelder Kupferschieferflöz. Als Lager bezeichnet man erzreiche Gesteine oder Erzmassen, die bei verhältnismäßig geringer Ausdehnung in die Weite als absonderliche Gebirgsglieder so zwischen den Schichten liegen, daß sie selbst für sedimentäre Bildungen gehalten werden müssen oder wenigstens zunächst solche zu sein scheinen; z. B. die Kieslager der verschiedensten Gegenden, die Bleierzlager im schlesischen Muschelkalk, die Magnetit- und Eisenglanzlager im schwedischen Urgebirge. Als Linsen bezeichnet man Lager mit verhältnismäßig großer Dicke. Fahlbänder sind kristalline Schiefer, welche lagenweise einen im Verhältnis sehr zurücktretenden Gehalt an Erzen führen. In der ursprünglichen, aus Norwegen stammenden Anwendung dieses Ausdruckes handelt es sich um vorwaltende sulfidische Erze.

Stöcke sind ganz unregelmäßig geformte, ringsum vom Nebengestein umschlossene, mitunter auch tief unter die Oberfläche verfolgbare Erzmassen von beträchtlicheren Ausmaßen, häufig mit etwa elliptischem oder kreisförmigem Querschnitt. Nester, Putzen Schmitzen, Knauer, Nieren und ähnliche Ausdrücke bezeichnen Erzanhäufungen kleineren und kleinsten Maßstabes. Erzlineale sind lagerartige Massen von linsenförmigem Querschnitte und sehr bedeutender Ausdehnung nach einer Richtung. Diese Bezeichnung wird für manche norwegische Kieslager gebraucht, die so in den Schichten liegen, wie ein Lineal zwischen den Blättern eines Buches.

Unter Seifen versteht man Geröllablagerungen, meist fluviatiler Herkunft, oder auch wohl oberflächlichen Verwitterungsschutt, welche Edelmetalle, Zinnerz, Edelsteine u. dgl. führen.

Erzgänge sind mit Erz ausgefüllte Spalten. Klüfte, Adern, Trümer, Schnüre sind Gänge von geringer Dicke und Ausbreitung. Stockwerke sind ausgedehntere, mit Erzadern dermaßen durchzogene Gesteinsmassen, daß das Gestein selbst wie Erz verarbeitet werden muß. Bot das Gestein selbst vermöge seiner Schicht-, Absonderungs- und Zerrüttungsklüfte oder in seinen Poren die Wege für die Einwanderung von Erz, so spricht man von Imprägnationen. Solche können stellenweise die Form von Lagern annehmen.

3b) Lage im Raum. Bei allen Lagerstätten bezeichnet man die geringste Dimension, senkrecht zwischen zwei mehr oder weniger parallelen Begrenzungsflächen gemessen, als die Mächtigkeit. Ist die Lagerstätte nicht horizontal („schwebend") gelagert, so bedeutet ihr Streichen (Fig. 1) den Winkel zwischen der Nordsüdrichtung und der in der Lagerstättenebene liegenden Horizontalen; unter dem Einfallen versteht man den spitzen Winkel, welchen die

Digitized by Google

Normale zur Streichrichtung mit dem Horizont bildet. Zeigt die Lagerstätte einen stark wechselnden Verlauf, so bezieht man sich auf zwei Richtungen, welche zwischen den wechselnden Streich- und Fallrichtungen die Mitte halten und spricht von Generalstreichen und Generalfallen. Als den **Ausbiß** oder **Ausstrich** bezeichnet man die-

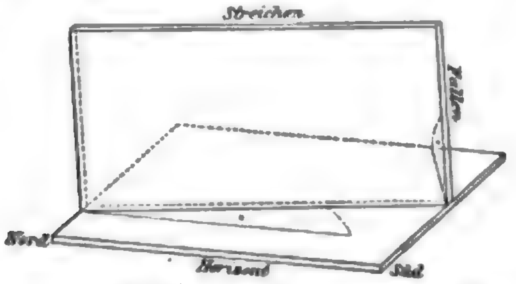


Fig. 1. × Winkel des Streichens; + Einfallswinkel. Aus Stelzner-Bergeat, Erzlagerstätten.

jenige Stelle, wo die Lagerstätte an die Oberfläche tritt. Durch jüngere Auflagerungen ist der Ausbiß gewöhnlich „verdeckt".

Von sehr wesentlicher Bedeutung für die jeweilige ununterbrochene Ausbreitung von Erzlagerstätten sind die **Gebirgsstörungen**, welche sich nach der Lagerstättenbildung zugetragen haben. Soweit die Erzlagerstätten, wie ein großer Teil der Flöze und Lager, gleichen Alters wie das Nebengestein sind, haben sie mit diesem sämtliche Störungen der ursprünglichen Lagerung, seine Faltung in Mulden und Sättel (Synklinalen und Antiklinalen), Deformationen wie Zerrungen, Zerreißungen und Zusammenstauungen erfahren. Für die Erzgänge, welche durch Ausfüllung solcher Spalten entstanden sind, die sich in der Regel erst nach der Faltung und in ihrem Gefolge bildeten, kommen fast nur diejenigen Gebirgsstörungen in Betracht, welche man in weiterem Sinne als Verwerfungen bezeichnet. Ihrem Wesen nach zerfallen diese in zwei ganz verschiedene Arten, in die **Verwerfungen** im engeren Sinne und in die **Ueberschiebungen**. Bei den echten Verwerfungen (Fig. 2 und 3) hat längs einer

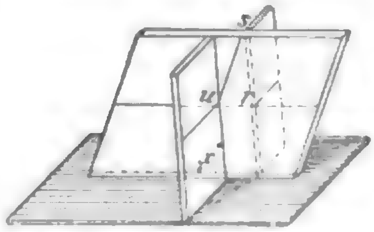


Fig. 2. Querverwerfung. x Sprungwinkel, su flache Sprunghöhe, ru Seitenverschiebung.

Zerreißungsfläche („Verwerfer") eine Bewegung in der Weise stattgefunden, daß der dem Verwerfer aufruhende, „hangende" Teil tiefer und sehr häufig auch etwas seitwärts von dem unter dem Verwerfer ruhenden („liegenden") zu liegen kam. Man gewinnt den Eindruck, als habe auf dem Verwerfer ein Abgleiten stattgehabt. Von einer Ueberschiebung spricht man, wenn längs einer, gewöhnlich recht flach liegenden „Ueberschiebungsfläche" der hangende Teil gegen den unter ihr liegenden emporgeschoben worden ist. Solche Ueberschiebungen sind sehr häufig begleitet von den Anzeichen einer vorherigen Zerrung infolge von Faltung (sogenannte Faltenverwerfungen). In ähnlicher Weise vermögen auch Verschiebungen in anderen Richtungen, z. B. in horizontaler, vor sich zu gehen.

4. Sekundäre Veränderungen der Mineralführung. Die Mineralführung der Lagerstätten steht in enger Beziehung zu ihren Entstehungsbedingungen. Hier mögen zunächst nur die Veränderungen besprochen werden, welche der Mineralbestand durch die nahe der Oberfläche stattfindende Ver-

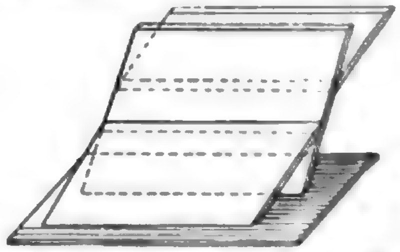


Fig. 3. Streichende Verwerfung.

witterung erfährt, und die einerseits zur Neubildung zahlreicher „sekundärer" Mineralien führen, andererseits für den technischen Wert der Lagerstätte von sehr hoher Bedeutung werden können.

Die Umwandlungen werden vorzugsweise durch das Wasser und den Sauerstoff der Luft, weiterhin durch die im Wasser enthaltene Kohlensäure und die durch dasselbe dem Boden entzogenen Halogensalze, Phosphate, Humussubstanzen und Stickstoffsauerstoffverbindungen usw. bewirkt. Sie bestehen in einer Hydratisierung und Oxydation, insbesondere auch in einer Umwandelung in Salze, welche mit den bezeichneten Stoffen und unter sich in Wechselwirkung treten können. Es bilden sich so Hydroxyde, Oxyde, Sulfate, Karbonate, seltener Tellurate, Chromate, Molybdate, Wolframate, Phosphate, Arseniate, Vanadate, Silikate, Chloride, Bromide und Jodide; auffällig ist auch das recht häufige Vorkommen besonders von gediegenem Kupfer und Silber, sehr gewöhnlich die Abscheidung von Gold aus goldhaltigen Erzen. Es sei dazu weiter daran erinnert, daß bei der Oxydation des überall verbreiteten Schwefelkieses freie Schwefelsäure entsteht:

$$FeS_2 + 7O = FeSO_4 + SO_3.$$

Die Umwandelung der Lagerstättenausstriche findet nur oberhalb des Grundwasserspiegels statt. Wo gleichwohl noch unterhalb desselben eine ausgiebige sekundäre

Digitized by Google

Mineralbildung beobachtet wird, wie z. B. auf den Siegerländer Spateisensteingängen, läßt sich in manchen Fällen nachweisen, daß der letztere in früheren Zeiten tiefer lag als jetzt.

Die Verwitterung des Lagerstättenausstriches führt zur Weglaugung von Mineralien und damit zu einem löcherigen, zerfressenen Aussehen der Masse; da die Eisensalze bei Anwesenheit reichlichen Wassers und von Luft schließlich in Brauneisenerz übergehen, so erscheint der Ausstrich gewöhnlich rostig und man bezeichnet deshalb diese verwitterten Massen als den „eisernen Hut" der Lagerstätte. Schreitet die Denudation rascher vorwärts als die Bildung des eisernen Hutes, so wird dieser letztere fehlen und die Lagerstätte tritt in unveränderter oder wenig veränderter Beschaffenheit an die Oberfläche. Dies gilt vor allem für Hochgebirge und Gegenden mit ehemaliger Gletscherbedeckung wie Skandinavien. Dagegen hat sich in regenarmen Gebieten, wie z. B. in den Wüsten Südamerikas, im Laufe langer Zeit eine bis in große Tiefen reichende Umwandlung der Lagerstätten vollziehen können, teilweise unter Erhaltung sogar leicht löslicher Verwitterungsprodukte.

Man hat in dem verwitternden Ausstriche häufig zweierlei Zonen zu unterscheiden: oben sehr oft einen von edleren Bestandteilen fast freien, im wesentlichen aus Brauneisenerz und Quarz bestehenden, mitunter klippenförmig aus der Landschaft hervortretenden Ausbiß und darunter eine reiche Anhäufung sekundärer, aus den niedersickernden Lösungen ausgeschiedener Erze, die sehr oft den eigentlichen Reichtum der Lagerstätte bildet. Bei dieser Umlagerung entstehen allgemein schwefelärmere oder schwefelfreie Erze, welche der Verhüttung geringere Schwierigkeiten bereiten. Es ist leicht verständlich, wenn nach der Erschöpfung dieser reichen Zonen sehr oft der Bergbau eingestellt wurde.

Gold wird aus dem verwitternden Schwefelkies frei und vermag sich auf der Lagerstätte zu gröberen Massen von Freigold zu konzentrieren. Kupferkies geht in Buntkupferkies und Kupferglanz über; desgleichen enthält der eiserne Hut oft große Mengen von gediegen Kupfer, Rotkupfererz und Karbonaten, die eine „oxydische Zone" über jenen sekundären Sulfiden zu bilden pflegen. Bleiglanz wird hauptsächlich zu Weißbleierz, das in ihm enthaltene Silber scheidet sich in gediegenem Zustande oder auch als Silberglanz oder als Silberchlorid, -bromid und -jodid aus. Aus der Zinkblende werden bei Gegenwart von Kalkstein die viel leichter verhüttbaren Galmeie. Der Galmei im Ausstrich vieler Blendelagerstätten ist schon seit dem Altertum zur Messingfabrikation benutzt worden, während erst im XIX. Jahrhundert die Verwendung der Zinkblende gelang. Manche jetzt unbedeutenden Kupfergruben verdankten ihren ehemaligen Reichtum den reichen oxydischen Erzen im eisernen Hute und den darunter liegenden reicheren sekundären Sulfiden, so in Chile, in Montana, in Toscana und in Südaustralien. Viele sehr reiche Silbererzlagerstätten, besonders in Nord- und Südamerika, wurden später als Bleiglanzlagerstätten verlassen und die bemerkte Verarmung der Golderzgänge in der Tiefe hat nicht nur darin ihre Ursache, daß mit der Zunahme unzersetzter Sulfide, insbesondere des Pyrits, die Gewinnung des Edelmetalles schwieriger wurde, sondern auch darin, daß im eisernen Hute tatsächlich eine abwärts gerichtete Konzentration des Goldes stattgefunden hatte.

Die im Obigen bezeichneten, durch Auslaugung und Wiederausscheidung bewirkten Erscheinungen werden wohl auch als die „sekundären Teufenunterschiede" bezeichnet.

5. **Systematik.** Eine wissenschaftliche Systematik der Erzlagerstätten muß von deren Entstehungsweise ausgehen. Eine sehr verbreitete Aufnahme hat die folgende, von dem Freiberger Geologen A. W. Stelzner († 1895) herrührende Systematik gefunden, welche die Erzlagerstätten nach ihrem Altersverhältnis zum Nebengestein und soweit sie mit diesem zugleich gebildet sind, nach der Entstehungsweise des letzteren unterscheidet.

I. Protogene (primäre) Lagerstätten. Die Erze sind an Ort und Stelle aus Lösungen (Schmelzen) kristallisiert, nicht durch chemische oder mechanische Verlagerung aus präexistierenden Erzabsätzen hervorgegangen.

1. Syngenetische Lagerstätten. Die Erze bilden einen gleichzeitig mit dem Muttergestein entstandenen Bestandteil dieses letzteren.

a) Magmatische Ausscheidungen in Eruptivgesteinen. Form: Einsprengungen, Putzen, Nester, Schlieren, Stöcke.

b) Schichtige oder sedimentäre Lagerstätten. Form: Einsprengungen, Flöze, Lager, Linsen, Nieren.

2. Epigenetische Lagerstätten. Die Erze sind nach der Bildung des Nebengesteins in dieses eingewandert.

a) Gänge. Ausfüllungen von Spalten der verschiedensten Dimensionen; letztere sind im wesentlichen ohne eine chemische Auflösung des Nebengesteines entstanden. Form: Mehr oder weniger ausgedehnte Lagerstätten von plattenförmiger Gestalt. Stockwerke. Imprägnationen.

b) Höhlenfüllungen und metasomatische Lagerstätten. Infolge der Mineralansiedelung hat eine chemische Auflösung des Nebengesteins stattgehabt; der von den Mineralien eingenommene Raum ist im wesentlichen durch eine solche geschaffen worden.

α) Die Lagerstätte enthält keine mit dem Erzabsatz gleichzeitig gebildeten Kontaktmineralien. Der Mineralansiedelung kann die Bildung von Hohlräumen vorherge-

Digitized by Google

gangen sein, oder der Mineralabsatz erfolgte unter schrittweiser Verdrängung (Metasomatose) des Nebengesteins. Das letztere ist fast durchweg Kalkstein oder Dolomit. Metasomatische Lagerstätten im engeren Sinne. Form: Stöcke, Lager, Linsen, Butzen, Nester, Schläuche; aufgelagerte Massen über Schratten, Karren, Racheln, in Taschen, Trichtern und Orgeln.

β) Die Lagerstätte ist während der Kontaktmetamorphose des Kalksteins durch einen eruptiven Durchbruch entstanden, das Erz ein Exsudat des Eruptivgesteins. Zur Mineralführung der Lagerstätte gehören Kontaktmineralien. Kontaktlagerstätten. Form: eingelagerte Stöcke usw. wie bei *α*, in der Regel im Kontakt zwischen dem Eruptivgestein und dem Kalkstein.

II. Deuterogene (sekundäre) Lagerstätten. Durch chemische oder mechanische Konzentration eines ärmeren Erzgehaltes nach der Auflösung oder Zertrümmerung älterer Gesteine oder Lagerstätten entstanden.

1. Eluviale Lagerstätten. Die Erze haben keinen nennenswerten Transport erfahren; hat auf chemischem Wege eine Konzentration zu gröberkörnigen Haufwerken stattgehabt, ist überhaupt die Verwitterung des Gesteins von einer chemischen Anreicherung des Erzgehaltes begleitet gewesen, so spricht man von metathetischen Lagerstätten. Form: Grus, erzführende Verwitterungsböden, erdige, sandige oder konglomeratartige Residuen, Klumpen, Knollen, Bohnerze usw.

2. Alluviale Lagerstätten (Trümmerlagerstätten, Seifen). Die nutzbaren Bestandteile bilden nach der Zerstörung ihrer ursprünglichen Lagerstätte zusammen mit Geröllen und Detritus einen Bestandteil von Alluvionen. Form: Klumpen, abgeriebene Kristalle, Flitterchen und Staub in Fluß-, seltener in marinen oder äolischen Ablagerungen.

6. Entstehung der Erzlagerstätten und damit zusammenhängende besondere Eigenschaften. 6a) Die magmatischen Ausscheidungen. Die in ihren Ursachen noch wenig erkannten Vorgänge, welche dazu führen, daß ein ursprünglich homogener Schmelzfluß (Magma) in chemisch verschiedene Teilschmelzen zerfällt (magmatische Differentiation oder Spaltung), und auf welche die Erscheinung zurückzuführen ist, daß demselben Magmaherde nach ihrer mineralogischen Zusammensetzung recht verschiedene Gesteine entstammen können, bewirken auch gelegentlich eine lokale Anreicherung der im Magma vorhandenen Schwermetalle. Soweit diese schon in einer früheren Zeit der Gesteinserstarrung kristallisieren und nicht etwa während der Festwerdung des Magmas ausgestoßen werden (vgl. unter 7), vermögen sie, manchmal bis zum fast vollständigen Ausschluß sonstiger Mineralausscheidungen, Lagerstätten von zumeist oxydischen Erzen zu erzeugen. Solcher Art sind die Schlieren, Klumpen, Stöcke und linsenförmigen Massen von Magnetit und Titaneisenerz, insbesondere in kieselsäureärmeren, zumeist den Gabbros nahestehenden Gesteinen und die massigen Anreicherungen von Chromeisenstein in manchen Peridotiten (basischen, hauptsächlich aus Olivin bestehenden Gesteinen). Wie hie und da das nickelhaltige metallische Eisen, so findet sich auch das Platin, meistens in feinster Verteilung, als magmatische Ausscheidung in Olivingesteinen, freilich in zu geringer Menge, als daß sich seine Gewinnung daraus lohnen könnte.

Magmatische Lagerstätten gehören zu den selteneren Typen. Ihre Erze sind dadurch gekennzeichnet, daß sie Uebergänge nach Eruptivgesteinen erkennen lassen.

6b) Schichtige (sedimentäre) Lagerstätten. Während der Bildung der Sedimente können dem sie absetzenden Wasser metallhaltige Lösungen irgendwelcher Herkunft zugeführt worden sein, aus welchen sich zu gewissen Zeiten, also geologisch gesprochen in bestimmten Schichthorizonten Erze niedergeschlagen haben. Ein Kennzeichen solcher erzführender Sedimente ist ihre „Horizontbeständigkeit"; ein weiteres besteht darin, daß neben den Erzen auch die normalen Bestandteile sedimentärer Gesteine, gelegentlich z. B. auch Gerölle, wohlerhaltene Versteinerungen u. dgl., in den Lagern gefunden werden. Durch Gebirgsdruck, Faltungen und Störungen kann die ursprüngliche Form solcher Ablagerungen sehr verwischt sein, durch Metamorphose ihr Mineralbestand ein besonderes Gepräge erhalten haben.

Der Erzgehalt der schichtigen Lagerstätten mag sich, soweit er aus Eisen- oder Manganerzen besteht, hauptsächlich aus der Zerstörung von Gesteinen herleiten, deren Eisen- und Mangangehalt unter der Einwirkung lösender Agentien, wie Kohlensäure, weggeführt und dann infolge Verlustes der letzteren meist unter Oxydation wieder ausgeschieden wurde. In solcher Weise bilden sich auf dem Festlande die See-, Sumpf- und Raseneisenerze und zwar vorzugsweise im Bereich der großenteils aus feinem Gesteinsdetritus bestehenden diluvialen Glazialablagerungen. Durch die bei der Fäulnis von Pflanzen entstehende Kohlensäure oder durch gewisse, als Humus-, Quell- oder Quellsatzsäure bezeichnete organische Komplexe wird das Eisenoxydul, welches vorher durch die Fäulnisprozesse und den Sauerstoffbedarf der fäulnisbewirkenden Bakterien aus Eisenoxyd erzeugt wurde, gelöst,

Digitized by Google

weggeführt, aber im Verlauf der Wanderung wieder oxydiert und als Brauneisenerz in der Gestalt von Knollen, Klumpen und Linsen ausgeschieden. Nicht ganz verschieden davon ist vielleicht das Vorkommen konkretionärer (oolithischer) Eisenerze in manchen Ablagerungen ehemaliger seichter Meeresteile, wie im thüringisch-böhmischen Silur, im Jura (Fig. 4), in der norddeutschen Kreide und im alpinen Eocän, während z. B. die bei Ilsede in Hannover auftretenden Eisenerze die sicheren Anzeichen einer Herkunft aus zusammengeschwemmtem Eisenschlamm an sich tragen, der von der Zerstörung mesozoischer Sedimente herrührt. Oolithische **Manganerze** kennt man z. B. aus alttertiären Ablagerungen zu Kutais im Kaukasus. Anderer Art sind wohl die im rechtsrheinischen Mittel- und Oberdevon verbreiteten Roteisensteinlager. Da sie immer an Diabase und deren Tuffe gebunden sind, so hat man ihre Entstehung mit dem Eintritt von vulkanischen Eisenchloriddämpfen oder Eisensäuerlingen in das devonische Meer in Zusammenhang gebracht. Ueber die Entstehung der vorzugsweise aus Eisensulfiden und Kupferkies bestehenden „**Kieslager**" gehen die Ansichten auseinander, wie denn auch unter Kieslagern jedenfalls Lagerstätten von sehr verschiedener Bildungsweise verstanden werden. Manche, wie z. B. diejenigen von Bodenmais in Bayern und von Falun in Schweden sind sehr wahrscheinlich eruptive Intrusionen, andere, wie diejenigen von Norwegen werden für gangartige, epigenetische Bildungen gehalten, während dagegen das Kieslager des Rammelsberges bei Goslar deutliche Versteinerungen führt. Der Kupferschiefer am Harz und in Thüringen gilt den meisten Geologen als syngenetisches Flöz, andere meinen, daß der Erzgehalt von Spalten her in die bituminösen Mergel eingewandert sei.

Niederschläge von Schwefeleisen bilden sich jetzt noch dort, wo Anhäufungen von Seetang verwesen. Gewisse Seetange vermögen nämlich dem Meerwasser Sulfate zu entziehen, die bei der Verwesung zu Sulfiden reduziert werden; letztere werden durch die bei der Fäulnis entstehende Kohlensäure unter Entwickelung von H_2S in Karbonate umgewandelt, wobei dann aus Eisenlösungen Schwefeleisen ausgefällt wird. Im Schwarzen Meere ist das Wasser schon in Tiefen unter 180 m so mit Schwefelwaserstoff durchschwängert, der von Fäulnisprozessen herrührt, daß darunter alles tierische Leben unmöglich wird; es erklärt sich so die Anwesenheit von erheblichen Mengen von FeS im Bodenschlamme.

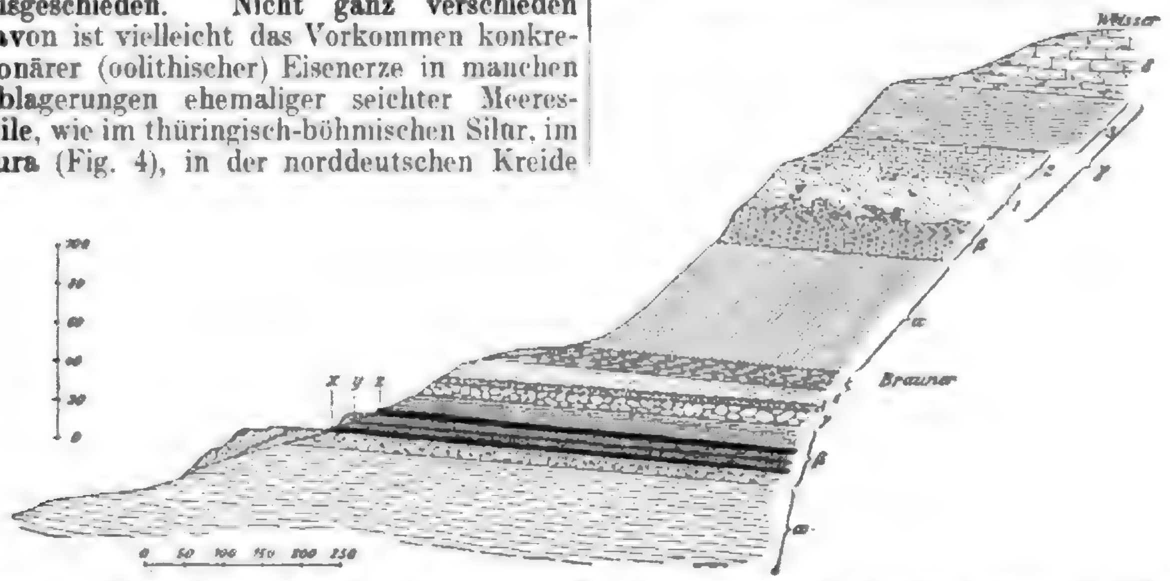


Fig. 4. Die Eisenoolithflöze bei Wasseralfingen. Braun-Jura: α Opalinus-Tone 100—110 m; β Personatensandstein 10 m, x unteres Eisensteinflöz, 1,6 m, Sandschiefer 3 m, y Zwischenflöz 0,7 m, Sandschiefer 6 m, z oberes Flöz 1 m, toniger Sandstein 6—9 m; γ Sowerbyi-Kalk 6 m; δ Giganteus- und Ostrea-Kalk 2 m; ε Parkinsoni-Oolith 9 m; ζ Ornatenton 9 m. Weiß-Jura: α Impressaton 50 m; β Biplex-Kalk 20 m; γ 1 Schwammfelsen, 2 Planulatenkalk, 3 Aptychenton, zusammen 70 m; δ Mutabilis-Kalke. — Maßstäbe in Metern. Nach E. Fraas. Aus Stelzner-Bergeat, Erzlagerstätten.

Die wichtigsten **Schwefellagerstätten** Europas, nämlich diejenigen im gipsführenden jüngeren Tertiär Siziliens, sind schichtiger Natur. Man erklärt ihre Entstehung teils durch eine Reduktion von Gips durch verwesende organische Substanzen (das Muttergestein der Schwefellager ist gewöhnlich reich an Bitumen) und die weiter im nachstehenden Schema bezeichneten Vorgänge:

$$CaSO_4 + 2\,C = CaS + 2\,CO_2$$
$$CaS + H_2O + CO_2 = CaCO_3 + H_2S$$
$$H_2S + O = H_2O + S$$

Der vorhin erwähnte zur Entstehung des Eisensulfids führende Vorgang kann bei Abwesenheit von Eisen auch die Bildung

Digitized by Google

von freiem Schwefel zur Folge haben. Eine andere Erklärungsweise bezieht sich auf die sogenannten Schwefelbakterien, welche als Nebenprodukt ihres Stoffwechsels bis zu 90% ihrer ganzen Masse an Schwefel auszuscheiden vermögen; sie erzeugen ihn aus dem bei Fäulnisprozessen entstehenden Schwefelwasserstoff und oxydieren ihn zu Schwefelsäure (vgl. den Artikel „Bakterien"). In den Limanen des Schwarzen Meeres spielen sie eine nicht unwesentliche Rolle.

mal die Schichten in solcher Menge erfüllen, daß letztere zu wichtigen Phosphatlagern werden können.

6c) Die Erzgänge. Die Zuwanderung der mineralbildenden Stoffe erfolgte auf Spalten, die sich in weitaus den meisten Fällen im Zusammenhang mit tektonischen Vorgängen bildeten und sich dann sehr oft als Verwerfungen zu erkennen geben. Manchmal sind indessen die Spalten nichts anderes als die Absonderungsklüfte eines erstarrenden Ge-

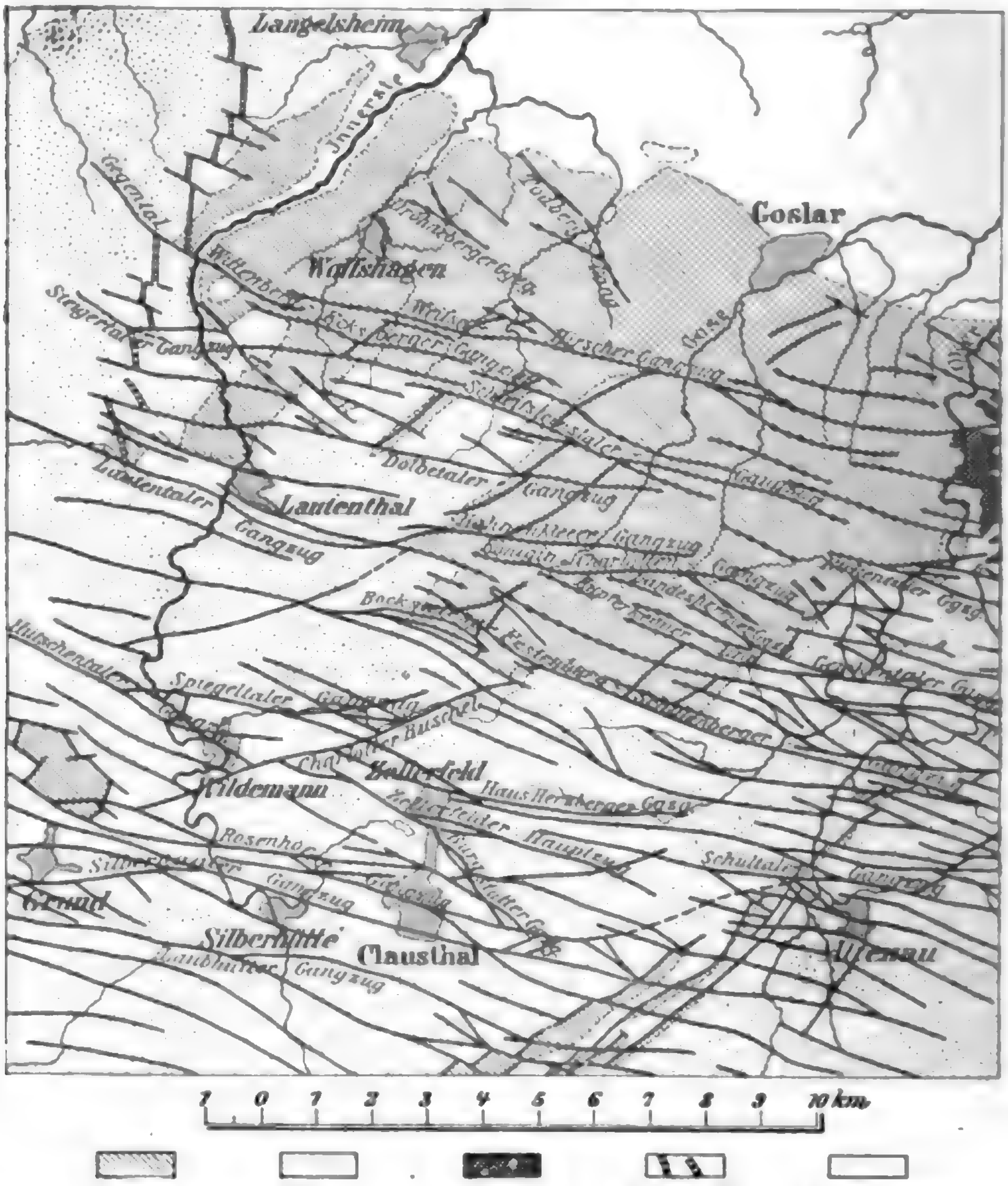


Fig. 5. Die Spalten, Erzgänge und Ueberschiebungen („Ruscheln") im Oberharz. Nach Beushausen. Aus Stelzner-Bergeat, Erzlagerstätten.

Wenn Flachseeablagerungen reich sind an Versteinerungen, insbesondere an Ueberresten von Wirbeltieren, so hat der in diesen vorhandene Gehalt an phosphorsaurem Kalk und Fluor nicht selten eine Konzentration in den hauptsächlich aus Apatit ($Ca_5(PO_4)_3F$) bestehenden Phosphoritknollen erfahren, welche neben den Versteinerungen manch-

steines, so z. B. die flözartig übereinanderliegenden Zinnerzgänge im Granit von Zinnwald, der durch sie in schalenförmig übereinanderliegende Bänke geschieden wird; oder das Spaltengewirre (Stockwerk) an der Peripherie des zinnführenden Granitstockes von Altenberg i. S., oder die zahlreich hintereinanderfolgenden Querabsonderungen man-

Digitized by Google

cher gangförmiger Intrusivgesteine (sogenannte „Leitergänge").

Da die durch die gleichen tektonischen Ursachen bewirkten Verwerfungen in demselben Gebiete gewöhnlich die gleiche Richtung besitzen, so ist auch das Streichen der Gänge desselben „Gangrevieres" oft ein gleichgerichtetes (Fig. 5). Wo sich, wie in der Freiberger Gegend, verschiedene Systeme gleichgerichteter Gänge durchschneiden, ist auch die Erzführung in den verschiedenen Systemen häufig verschieden. Das Einfallen der Gänge ist gewöhnlich ein steiles. Ihre streichende Länge mißt häufig nur wenige hundert Meter, recht oft aber auch mehrere, manchmal sogar viele Kilometer. Die „einfachen Gänge" bestehen lediglich aus der Ausfüllung einer, gewöhnlich nur nach Dezimetern messenden Spalte; „zusammengesetzte Gänge" hingegen sind erzerfüllte Zerrüttungszonen, bestehen also aus einem ganzen System ineinander verlaufender „Trümer" und Gänge mit zwischengelagerten Schollen des zerrissenen Nebengesteins. Die zusammengesetzten Bleiglanzgänge der Clausthaler Gegend (Oberharz) erreichen bis zu 80 m Mächtigkeit. Andererseits können einfache Klüfte bis zur geringen Dicke von wenigen Millimetern, wenn sie goldführend sind, immer noch als wertvolle Gänge gelten. Die Mächtigkeit der Erzgänge kann beträchtlichen Wechseln unterworfen sein, d. h. sie „verdrücken" sich bald, bald „tuen sie sich auf". Wieweit die Gänge in die Tiefe reichen können, ist nicht bekannt; Tatsache ist, daß sie stellenweise noch in Schächten von mehr als 1000 m Tiefe abgebaut werden, ohne daß sich Anzeichen einer Endigung hätten wahrnehmen lassen.

Die Gangfüllung besteht aus den Erzen und den unbrauchbaren Gangarten, sowie gelegentlich aus Bruchstücken des Nebengesteins. Treten die Erze sehr zurück, so wird der Gang „taub".

Sämtliche bereits oben (2a) aufgezählten Erze mit Ausnahme weniger, wie des Rotzinkerzes, der Zinkspinelle, des Chromits und Bauxits sind auf Erzgängen anzutreffen, deren mineralogische Erscheinungsweise bedeutend vielartiger ist, als die irgendeines anderen Lagerstättentypus.

Gangstruktur. Die Anordnung der Gemengteile einer Gangfüllung (ihre „Struktur") läßt fast immer erkennen, daß die Kristallisation wie aus einer wässerigen Lösung vor sich gegangen ist, wobei sich lagenweise Krusten verschiedener Mineralien, mitunter in wiederholter Folge, ausgeschieden haben. Die Aufeinanderfolge der Krusten ist nicht selten in gleicher Weise an beiden Spaltenwänden zu beobachten, wodurch die Gangfüllung einen ganz charakteristischen symmetrischen Aufbau erhält (Fig. 6). Gewisse Erze pflegen dabei immer vor anderen auskristallisiert zu sein, d. h. die Altersfolge („Sukzession") in den Gangfüllungen ist keine ganz gesetzlose. Enthält der Gang Bruchstücke des Nebengesteins oder einer

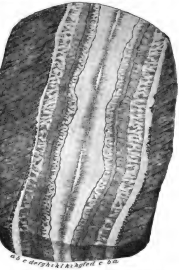


Fig. 6. Gangstufe der barytischen Bleiformation vom Prinzen-Spat der Grube Churprinz bei Freiberg. a Braune Blende, b weißer Quarz, c spargelgrüner Flußspat, d zarter Saum von brauner Blende, e schmutzigfleischroter, krummschaliger Schwerspat, f schmaler Saum von Strahlkies, g Schwerspat = e, h Flußspat = c, i Strahlkies = f, k weißer Kalkspat, l licht-weingelber Kalkspat, in der Mitte kleine Drusen bildend. Nach v. Weißenbach.

älteren Ausfüllung der Spalte, so spricht man von „Gangbreccien"; zeigt die jüngere, verkittende Füllmasse um die Bruchstücke herum die vorhin erwähnte Lagenstruktur, so spricht man wohl von „Kokardenerzen". Sind die einzelnen Bestandteile der Füllung unregelmäßig und ohne deutliche Altersunterschiede miteinander verwachsen, so entsteht die „massige Gangstruktur".

Gewöhnlich ist die Ausfüllung der Gangspalte nicht völlig zu Ende gediehen; es hinterbleiben dann mehr oder weniger nahe der Medianebene Hohlräume, die mit den zuletzt ausgeschiedenen Kristallen ausgekleidet sind; es sind das die oft so prächtigen „Drusen".

Paragenesis. Das Vorkommen der zahlreichen auf Erzgängen anzutreffenden

Digitized by Google

Mineralarten ist zunächst durch bestimmte Existenz- und Entstehungsbedingungen geregelt. Viele Mineralien fehlen vollständig in den primären Gangfüllungen, sind aber ganz gewöhnliche Erscheinungen in den sekundären Gebilden des eisernen Hutes, wie z. B. sämtliche Kupfer- und Bleisalze der Sauerstoffsäuren, das Brauneisenerz usw.; andere bilden sich niemals im eisernen Hute, wie Magnetit, Wolframit, Speiskobalt usw. Weiterhin ist in der primären Gangfüllung selbst das Zusammenvorkommen der Erze und Gangarten geregelt durch die zumeist noch wenig erklärbaren Gesetzmäßigkeiten, die man mit Breithaupt (1849) als die Paragenesis der Mineralien bezeichnet und die darin bestehen, daß gewisse Mineral(Stoff-)-Kombinationen an den verschiedensten Orten der Erde wiederkehren und dort für ganze Gangreviere charakteristisch sein können, dabei nicht nur von anderen Mineralien, sondern auch von einer ganzen Reihe chemischer Elemente geradezu gemieden zu werden pflegen. So ist die Kombination Quarz, Schwefelkies, Gold in den „Goldquarzgängen" über die ganze Erde verbreitet, ebenso der Bleiglanz in Begleitung der Zinkblende; an vielen Orten findet sich das Zinnerz mit einer treuen Genossenschaft von Quarz und wolfram-, lithium-, bor- und fluorhaltigen Mineralien, der z. B. Antimon, Silber, Blei und Zink vollständig fehlen. Mit einem alten Freiberger Ausdruck bezeichnet man diese Mineralkombinationen als „Formationen"; zu Freiberg selbst unterscheidet man mehrere, teilweise auch im Alter verschiedene und in verschieden gerichteten Gangsystemen auftretende Erzformationen.

Unregelmäßigkeit der Erzführung. Die primäre Mineralführung eines Ganges kann sowohl in horizontaler wie in vertikaler Erstreckung (im Streichen und Fallen) wechseln; so beobachtet man z. B. in gewissen Oberharzer Gängen, daß mit zunehmender Tiefe Zinkblende an die Stelle des Bleiglanzes tritt. Man bezeichnet diese Erscheinung kurz als den „primären Teufenunterschied". Zu Schemnitz in Ungarn sind einzelne Gänge in ihren nördlichen Teilen goldreicher, in ihren südlichen silberreicher; mit zunehmender Tiefe geht dort die Silbererzführung in eine Golderzführung über.

Der Reichtum (Adel) eines Ganges ist übrigens nicht in seiner ganzen Ausdehnung derselbe, er wechselt vielmehr, indem die Erze in „Mitteln" angereichert erscheinen, deren Anordnung häufig eine gewisse Regelmäßigkeit zeigt. Durchsetzt ein Gang verschiedene Arten von Nebengesteinen, so findet recht oft mit dem Wechsel des letzteren auch eine Zunahme oder Verminderung der Erzführung statt (Fig. 7). Eine allgemeine Regel besteht in solcher Beziehung nicht, indessen ist es eine oft gemachte Wahrnehmung, daß Nebengestein, das selbst erzführend ist (z. B. der Kupferschiefer oder Fahlbänder) auf durchsetzende Erzgänge veredelnd wirkt. Zu Freiberg fand eine erhebliche Veredelung dort statt, wo ein jüngerer Gang spitzwinkelig auf einen älteren traf und eine Strecke weit dessen Verlauf folgte, d. h. „geschleppt" wurde.

Während die vorhin erwähnte Abhängigkeit der Erzführung von der Art des Nebengesteins zweifellos chemischen Einflüssen zuzuschreiben ist, wird selbstverständlich auch die verschiedene Möglichkeit der Spaltenbildung in verschiedenen Gesteinen, die ganz von deren Struktur abhängt, für das Auftreten von Erzgängen und deren Mächtigkeit von Belang sein.

6d) Höhlenfüllungen und metasomatische Lagerstätten. Bei den Erzgängen beschränkt sich der Mineralabsatz im wesentlichen auf den mechanisch gebildeten Spaltenraum; eine Imprägnation des Nebengesteins oder eine teilweise Verdrängung hat in manchen Fällen statt, die Lagerstätte behält dabei aber doch immer die Form einer nach zwei Richtungen vorwaltend entwickelten Platte. Viel mannigfaltiger

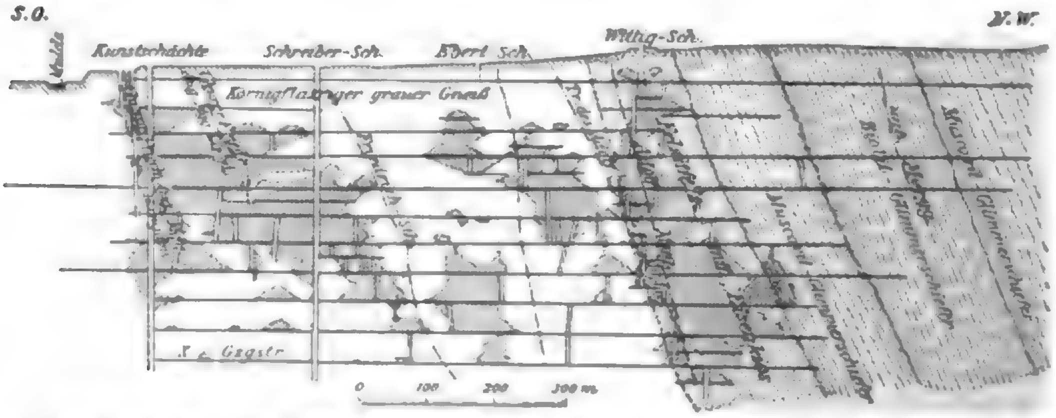


Fig. 7. Die Verteilung der Erzmittel im Ludwigspatgang zu Freiberg und ihre Abhängigkeit vom Nebengestein. Nach H. Müller. Aus Stelzner-Bergeat, Erzlagerstätten.

Digitized by Google

wird die Gestalt, wenn die erzabsetzenden Lösungen längs irgendwelcher Spalten mit dem verhältnismäßig leicht löslichen Kalkstein in Berührung kommen. Es mögen dann zunächst Hohlräume entstehen, die durchaus dieselbe Formenmannigfaltigkeit besitzen, wie die durch die Atmosphärilien längs Klüften, also auch an der Grenze zwischen leichtlöslichen Kalk- und schwerer-löslichen oder unlöslichen Gesteinen und zumal auch längs Schichtflächen oder im Durchschnitte von Spalten erzeugten Auslaugungshöhlen. Die ausgezeichnete Lagenstruktur mancher an Kalksteine gebundener Lagerstätten spricht dafür, daß dem Erzabsatz tatsächlich die Bildung eines Hohlraumes vorhergegangen sein muß und man kann dann von Höhlenfüllungen sprechen. Allgemein kann man die oft recht unregelmäßig gestalteten Erzansiedelungen im Kalkstein als metasomatische (Metasomatose = Verdrängung) bezeichnen, wenn man damit nicht sagen will, daß der letztere selbst immer als ausfällendes Agens gewirkt habe und dabei gewissermaßen molekelweise von den Mineralansiedelungen verdrängt worden sei. Die Formen, welche metasomatische Lagerstätten annehmen können, sind in den Figuren 8 und 9 dargestellt. Recht verbreitet sind lagerartige Vorkommnisse, die dadurch entstehen, daß die mineralbildenden Lösungen längs Schichtflächen eindrangen; sie werden vielfach als Lager bezeichnet und es ist ihnen früher häufig auch eine sedimentäre Entstehung zugeschrieben worden.

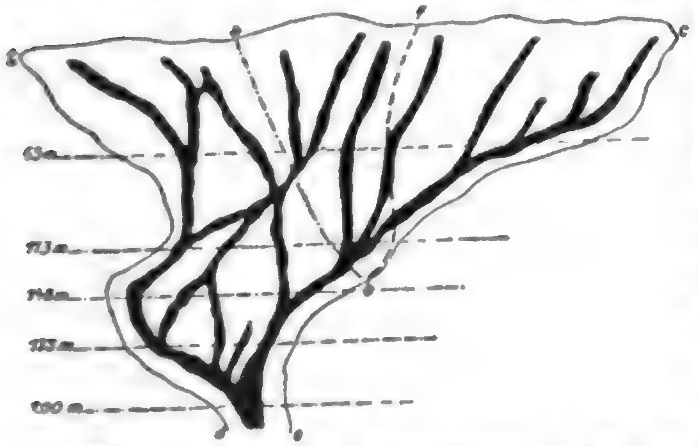


Fig. 8. Sogenannte Erzschläuche. Zinnobervorkommen im Kalkstein von Siele in Toskana. Nach Spirek. Aus Stelzner-Bergeat, Erzlagerstätten.

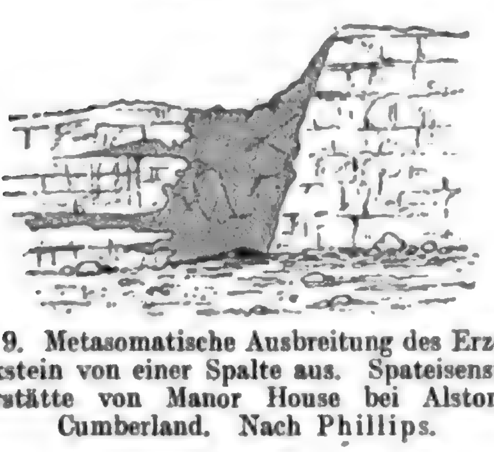


Fig. 9. Metasomatische Ausbreitung des Erzes in Kalkstein von einer Spalte aus. Spateisensteinlagerstätte von Manor House bei Alston in Cumberland. Nach Phillips.

Zu den metasomatischen Lagerstätten in dem vorhin gefaßten Sinne gehören vor allem zahlreiche Blei- und Zinkerzlagerstätten, wie diejenigen im Muschelkalk von Beuthen und Tarnowitz in Oberschlesien, im Kohlenkalk der Aachener Gegend, im Silurkalk des Mississippi- und Missourigebiets, im Wettersteinkalk der Alpen, insbesondere Kärntens usw.; ferner auch gewisse Spateisensteinlager im Zechstein Deutschlands und in paläozoischen Kalksteinen der Alpen oder der Kreide Nordspaniens (Bilbao).

Die Verdrängung des Kalksteins kann auch durch Lösungen erfolgen, welche auf seiner Oberfläche Eisen- und Manganerze absetzen. Sie führt dann zu den unter den Namen Schratten, Racheln, Karren, geologische Orgeln usw. bekannten, vielfach schon durch gewöhnliche Tagewässer erzeugten Austiefungen. Ausgezeichnete Beispiele solcher Art sind die oberflächlichen Mangan- und Eisenerzauflagerungen auf dem Stringocephalenkalk des Lahntales, besonders bei Gießen und Wetzlar. In derselben Gegend finden sich auch metasomatische Phosphoritauflagerungen. Auf zahlreichen Koralleninseln Westindiens und z. B. auf den Jaluit-Inseln (Marshall-Archipel) bilden sich Phosphorite durch direkte Einwirkung des Kalkes auf die Lösungen von Ammoniumphosphat, das aus den massenhaften Fäkalien der dort hausenden Vögel und Robben entsteht. In ähnlicher Weise mögen auch die metasomatischen Phosphorite der versteinerungsreichen oberen Kreide in Artois, in der Picardie und im benachbarten Belgien und solche z. B. in Florida zu erklären sein.

6e) Kontaktlagerstätten. Eine besondere Art der metasomatischen Lagerstätten sind die Kontaktlagerstätten. Sie sind dadurch entstanden, daß beim Durchbruch eines Tiefengesteines durch ein reaktionsfähiges Nebengestein — in den allermeisten Fällen, wenn nicht immer, sind es Kalksteine oder sonstige an Kalziumkarbonat reiche Sedimente —, die von jenem ausgestoßenen Dämpfe oder vielleicht auch heiße wässerige Exsudate mit dem Nebengestein in Wechselwirkung traten, so daß unter Verdrängung des letzteren eine Stoffzufuhr in dasselbe statthatte. Nicht nur an der Grenze zwischen dem Kalkstein und der eruptiven Injektion („dem Kontakt"), sondern auch auf Klüften im Kalkstein selbst finden sich dann die als Kontaktmineralien bekannten, kalk-, tonerde- und magnesiareichen, auch wohl Eisen und Mangan enthaltenden Silikate (vgl. 2b) zusammen mit Quarz, sehr selten

Digitized by Google

auch mit Flußspat und in der Regel durchwachsen mit mehr oder weniger Magnetit, Pyrit und Kupferkies; diese letzteren bilden die wichtigsten Erze der Kontaktlagerstätten, zu denen manchmal auch Bleiglanz und Zinkblende und andere Sulfide oder Oxyde treten. Die Verteilung der Erzmassen und ihre Gestalt sind ganz unregelmäßig, letztere ist im allgemeinen als stockartig zu bezeichnen. Zu den Kontaktlagerstätten gehören mit Sicherheit die Magnetitlagerstätten des Banats (Südungarn), die von Schmiedeberg in Schlesien, die Eisenglanz- und Magnetitlager auf Elba, auch gewisse Kupfererzlagerstätten im Ural, in Arizona, in Nordmexiko usw. Auch gewisse, an Kalkstein des Urgebirges gebundene Magnetitlager z. B. in Mittelschweden und zu Arendal in Südnorwegen gehören wohl in diese Gruppe; die aus Diopsid, Granat, Vesuvian usw. bestehenden Silikatfelse, welche die Erze begleiten, bezeichnet man dort als „Skarn“.

6f) Die eluvialen Lagerstätten (eluviale Seifen). Die eluvialen Lagerstätten entstehen bei der Verwitterung und oberflächlichen Auflockerung (Vergrusung) von Gesteinen, wobei die leichteren oder der chemischen Unwandlung leicht zugänglichen Bestandteile mechanisch oder in gelöstem Zustand allmählich entfernt werden, die schweren oder der Auflösung widerstrebenden Gesteinskomponenten eine Anreicherung erfahren. Die letztere wird in sehr vielen Fällen noch gefördert durch eine chemische Konzentration und führt zu einer Sammlung ursprünglich fein und spärlich verteilter Bestandteile zu grobem Sand, zu Klumpen und Nieren. Diese chemische Konzentration, die sich z. B. auch im eisernen Hut der Erzlagerstätten vollzieht, wird als Metathese (Umlagerung) bezeichnet. Man kann diese Lagerstätten auch als „Residualseifen“ (residuum, der Rückstand) bezeichnen.

Eines der bekanntesten Beispiele einer solchen Metathese bildet die Anhäufung von Eisenerzen über eisenhaltigen Gesteinen; sie erscheinen in der Form von „Bohnerzen“ oder von erdigem Brauneisenerz auf der zerfressenen, ausgehöhlten Oberfläche z. B. des Jurakalkes in der Schweiz und Süddeutschland, als „Terra rossa“ in den Karren und Aushöhlungen der Kalksteine in den Südalpen und im Mittelmeergebiet; sie haben dann oft auch durch Zusammenschwemmung eine mechanische Konzentration erfahren. Als oberflächliche Zersetzungsprodukte basaltischer Tuffe und Ströme sind die am Vogelsgebirge verbreiteten Brauneisensteine zu erklären. Durch eine tiefgreifende Auslaugung tonerdehaltiger Gesteine verschiedener Art, vor allem tonhaltiger Kalksteine, indessen auch feldspatführender Syenite, Gneiße usw. entstanden die für die Aluminiumfabrikation so wichtigen Bauxitlager in Südostfrankreich, Mittelitalien und in den nordamerikanischen Staaten Georgia, Alabama und Arkansas. Durch die metathetische Anreicherung eines sehr geringen Kobaltgehaltes sind bei der oberflächlichen Zersetzung von Serpentin die als „Trüffelerze“ bezeichneten Asbolanknollen auf der Insel Neukaledonien entstanden. Eluviale Golderzlagerstätten sind in Westaustralien, in Brasilien, in Guayana, Surinam, auf Madagaskar und in den Alleghanies bekannt.

6g) Alluviale Seifen. Auf den alluvialen Seifen finden sich Geschiebe, Körner, Kristalle, Blättchen oder Staub gewisser gegen chemische Einwirkungen und z. T. auch gegen die mechanische Zerkleinerung widerstandsfähiger Metalle oder sonstiger Mineralien, welche bei der Zerstörung ihrer ursprünglichen Lagerstätte durch fließendes oder brandendes Wasser oder durch den Wind, sehr selten vielleicht auch durch Gletscher verschleppt und vermöge ihres hohen spezifischen Gewichtes angereichert worden sind. Als nutzbare Bestandteile kommen in Betracht Gold, Platin und die Platinmetalle, Edelsteine, Zirkonverbindungen, Monazit, Zinnstein, nicht aber Silber, das im Boden allmählich in das nicht widerstandsfähige Chlorsilber übergeht. In den englisch sprechenden Ländern werden die Metallklumpen der Seifen als „nuggets“ bezeichnet.

In den fluviatilen Ablagerungen, denen weitaus die allermeisten Seifen angehören, hat infolge einer fortgesetzten Aufschwemmung eine abwärts gerichtete, durch die Schwere bedingte Wanderung der Edelmetalle stattgefunden, die sich darum vorzugsweise auf dem Boden der Geröllmassen in den Unebenheiten des anstehenden Felsgesteins angereichert finden. Die wichtigsten Seifenablagerungen folgen nicht den heutigen Flußläufen, sondern sind an die oft hochgelegenen Schottermassen alter, jetzt verlassener Strombetten gebunden. Erst aus diesen gelangt ihr nutzbarer Inhalt dann mitunter in die heutigen Flüsse.

7. Beziehungen der Erzlagerstätten zum Magma. Daß alle Metalle der Erzlagerstätten sich aus dem Stoffbestand des irdischen Magmas herleiten, ist selbstverständlich. Der Erzinhalt der Sedimente mag allerdings lange Umwege zurückgelegt und oftmalige Verlagerungen durchgemacht haben. Ein mehr oder weniger unmittelbarer Zusammenhang zwischen der Bildung der allermeisten epigenetischen Lagerstätten und den im Magma sich vollziehenden Erstarrungsvorgängen wird seit langem von vielen Geologen für wahrscheinlich gehalten; nach ihrer Auffassung sind mit wenigen Ausnahmen die Gänge, die Kontaktlagerstätten und die (nicht aufgelagerten, vgl. 6d) meta-

Digitized by Google

somatischen Lagerstätten durch Dämpfe oder Lösungen gebildet, die von unten emporstiegen (Aszension). In einzelnen Fällen entstammt der Erzgehalt der Gänge sicherlich dem Nebengestein und ist durch Auslaugung in Spalten eingewandert und dort unter Konzentration wieder ausgeschieden worden (Lateralsekretion); letzterer Vorgang entspricht dann der Bildung der so häufigen Kalkspat-, Quarz- oder Zeolithklüfte. Auf solche Art bildeten sich die grünen Magnesia-Nickelhydrosilikate in den hochgradig zersetzten Peridotiten oder Serpentinen zu Frankenstein in Schlesien oder auf Neukaledonien; das Muttergestein ist hier selbst ein wenig nickelhaltig. Die Annahme einer Lateralsekretion ist jedoch in dem weiten Umfange, wie F. Sandberger (um 1880) wollte, nicht anwendbar.

Daß das Magma stellenweise sehr reich an Schwermetallen sein kann, beweisen die magmatischen Ausscheidungen von Oxyden und Metallen und das Auftreten von nickelführendem Magnetkies und von Kupferkies unter Umständen, welche die letzteren als Aussonderungen in späteren Phasen der Verfestigung gabbroartiger Gesteine zu erkennen geben. Die Ausstoßung von Stoffen mannigfacher Art, darunter auch von Schwermetallen wie Eisen, Kupfer, Blei usw. und von Metalloiden wie Arsen, Schwefel, Selen, Bor wird an Vulkanen beobachtet. Auf solche „pneumatolytische", d. h. durch die Reaktion von Gasen bedingte Vorgänge ist auch zumeist die Entstehung der Kontaktlagerstätten zurückzuführen. Die Fumarolen der Vulkane zeigen, daß im Magma enthaltene Bestandteile vergasbare Verbindungen zu bilden vermögen. Ob diese letzteren aus dem Magma austreten, hängt davon ab, ob sie den auf ihm lastenden Druck vermöge ihres eigenen Gasdruckes zu überwinden vermögen. Der letztere nimmt mit der Auskrystallisation der Schmelze zu, weil die vergasbaren Stoffe in der Lösung mehr und mehr konzentriert werden. Bei der ungeheuren Verbreitung des Granites, der weitaus das wichtigste Tiefengestein darstellt, wird man annehmen dürfen, daß sich aus dem Granitmagma der Stoffbestand vieler epigenetischer Lagerstätten herleitet. Der große und mannigfaltige Mineralreichtum vieler Pegmatitgänge, d. h. jener sehr grobkörnigen, vorzugsweise aus Quarz und Feldspat bestehenden Gesteine, welche als die erstarrten Restlösungen des granitischen Magmas gedeutet werden müssen, weist darauf hin, daß sich in den letzteren zahlreiche Stoffe ansammeln, welche in den normalen Bestand des Gesteins selbst nicht eingehen. Die mineralogische Zusammensetzung mancher echter Erzgänge, z. B. diejenige gewisser Golderzgänge und vor allem der Zinnerzgänge hat eine große Aehnlichkeit mit jenen pegmatitischen Bildungen, von denen sie sich immerhin durch das Zurücktreten der Alkalien unterscheiden, während sie bedeutend mehr Kieselsäure enthalten als die Pegmatite. In der Tat zeigen auch sehr viele Goldquarzgänge und ganz besonders die Zinnerzgänge sehr nahe geologische Beziehungen zu Granitintrusionen, und die letzteren hat man überhaupt nur in der Nähe solcher angetroffen; teilweise treten sie in ihnen selbst oder in ihrem Kontakthofe auf, so daß viele Granitmassive geradezu von Zinnerzgängen umschwärmt sind. Zum Mineralbestand dieser letzteren gehören unter anderem Mineralien, die sich auch in den Drusenräumen der Pegmatite oder als Gebilde der „letzten pneumatolytischen Aeußerungen" in den Graniten vorfinden, wie der bor- und fluorhaltige Turmalin, das Fluoraluminiumsilikat Topas, der Orthoklas, Lithionglimmer, seltener Berylliumsilikate (Beryll und Phenakit), sowie Molybdänglanz, Apatit, Flußspat und andere. Sie unterscheiden sich von den gewöhnlichen Erzgängen insbesondere durch das mehr oder weniger reichliche Einbrechen von Silikaten. Viele andere Gänge entbehren dieser Silikatführung und machen nach Struktur und Mineralführung ganz den Eindruck von Absätzen aus wässerigen Lösungen. Da sie in mehr oder weniger großer Tiefe entstanden sein müssen, so hält man sie für Thermalabsätze. Trotzdem sie in sich selbst eine sichere Beziehung zu eruptiven Gesteinen nicht erkennen lassen, wird eine solche doch mit höchster Wahrscheinlichkeit zu vermuten sein, wenn sie, wie manche Goldsilbererzgänge oder manche Kupfererzgänge an die Nähe eruptiver Durchbrüche gebunden sind und mit der Entfernung von letzteren auch die Erzführung einer Gegend gewissermaßen ausklingt. Viele Erzgänge und metasomatische Lagerstätten, insbesondere solche mit Blei- und Zinkerzen lassen zwar tatsächlich keinerlei Beziehung zum Magma erkennen und sie treten häufig in Gebieten auf, in denen weit und breit kein Eruptivgestein die Oberfläche erreicht hat. Zwischen den epigenetischen Lagerstätten herrschen jedoch in stofflicher Beziehung so viele Uebergänge, daß es gleichwohl erlaubt ist, an eine Einheit des Phänomens zu glauben und für alle eine Herkunft aus dem Magma anzunehmen. Man kann vielleicht annehmen, daß manche Stoffe, wie eben Blei und Zink, weiter vom Magma abzuwandern vermögen als andere, etwa Zinn und Gold, und daß erstere auf Spalten noch bis in solche Zonen der Erdkruste vordringen können, bis zu welchen sich aufsteigendes Magma auch durch die Kontaktmetamorphose nicht mehr verrät.

Elie de Beaumont (1847) hat die meisten Erzgänge als thermale Mineralabsätze be-

Digitized by Google

zeichnet und nicht nur für die gelösten Stoffe, sondern auch für das lösende Wasser eine Herkunft aus dem Granitmagma behauptet; beide sollten daraus durch Exhalation ausgeschieden, das Wasser durch Kondensation in kühleren Gesteinszonen aus ausgeatmeten Wasserdämpfen entstanden sein. Er unterschied im übrigen die sämtlichen Thermen in zwei Gruppen, nämlich in solche, welche lediglich die in die Tiefe eingesickerten und dort erwärmten atmosphärischen Wässer nach der Erdoberfläche zurückführen, und in diejenigen, welche aus dem Magma selbst ihren Ursprung nehmen. In ähnlichem Sinne hat E. Sueß (1902) zwischen den „vadosen" Quellen meteorischen Ursprungs und den magmatischen „juvenilen" unterschieden. Die Frage, ob sich wirklich juvenile Quellen nach der Oberfläche ergießen, ist indessen nicht entschieden.

Als Einwurf gegen die Annahme einer thermalen Entstehung der meisten Erzgänge kann nicht gelten, daß viele der in ihnen vorkommenden Mineralien in Wasser unlösliche Verbindungen seien, wie z. B. der Schwerspat, der Quarz, der Flußspat oder der Eisenglanz; denn in Wasser ganz unlösliche Stoffe wird es kaum geben. Viele sehr schwer lösliche Ausscheidungen könnten zudem auch erst durch die Wechselwirkung von Lösungen entstanden sein, welche jeden ihrer Komponenten für sich enthielten, wie z. B. nachweislich Schwerspat in der Natur dadurch entstehen konnte, daß sich eine Lösung von $BaCl_2$ mit einer solchen eines Sulfates mischte. Auch ist es denkbar, daß das Sulfat des Baryums erst dadurch entstand, daß sulfidhaltige Baryumlösungen durch Beimischung von Sauerstoff oxydiert wurden.

Zur Unterstützung der „Thermalhypothese" wird häufig daran erinnert, daß manche Mineralwässer geringe Mengen von Stoffen führen, die gewöhnlichen Quellen fremd sind, und daß es dann gelegentlich auch zu Abscheidungen kommt, die man als mehr oder weniger häufige Bestandteile der Erzgänge antrifft.

So soll das Wasser von Wildbad in Württemberg u. a. Borsäure, Arsensäure, Lithium, Baryum und Zinn, der Cannstatter Sprudel Borsäure, Jod, Brom, Fluor, Baryum, Arsen, Kupfer, Blei und Antimon führen. In der Pyrmonter Badequelle wies Fresenius Zink, Nickel, Kobalt, Blei, Kupfer, Antimon, Arsen und Titan nach. Der Karlsbader Sprudelstein enthält etwa 0,3 % $SrCO_3$ und ca. 1 % CaF_2, auch gelegentlich etwas Arsen. Es wurde berechnet, daß der Karlsbader Sprudel täglich mindestens 30 Pfund Flußspat absetze. Quellsinter bei Steamboat Springs in Nevada führen Spuren von Gold, Silber, Zinnober, Blei, Kupfer, Zink, Kobalt, Nickel, Eisen und nicht unbeträchtliche Mengen von Antimon und Arsen. Da man im Auge behalten muß, daß die Metallführung solcher Quellen, deren Zahl sich noch erheblich hätte vermehren lassen, da und dort auch präexistierenden Lagerstätten entstammen kann, insbesondere wenn sie in Gangrevieren ihren Ursprung haben, so sind solche Beispiele nicht unbedingt beweisend.

In dem Mineralbestand der epigenetischen Lagerstätten kommt weder quantitativ noch qualitativ der Stoffbestand der mineralbildenden Lösungen zum vollständigen Ausdruck. Mit dem Wasser, welches man mit großer Wahrscheinlichkeit als das Lösungsmittel bezeichnen darf, mag ein großer Teil des gelösten verschwunden sein, ohne Spuren zu hinterlassen. Man hat versucht, aus den oft tiefgreifenden Veränderungen, welche das Nebengestein der Erzgänge erfahren haben kann, auf die chemische Beschaffenheit der gangfüllenden Lösung Schlüsse zu ziehen. Recht häufig ist eine Verquarzung desselben. Oft beobachtet man eine reichliche Bildung von Kaliglimmer (Muskovit, Serizit) im Nebengestein. Auf einer Umwandlung des Orthoklases in Glimmer und Quarz beruht die sogenannte „Greisenbildung" im granitischen Nebengestein der Zinnerzgänge und mancher Gold- und Kupfererzgänge; auf eine Zufuhr von Bor und Fluor ist das reichliche Auftreten von Turmalin, auf eine solche von Fluor die Topasbildung im Nebengestein vieler Zinnerzgänge zurückzuführen. Die Auslaugung von Eisenoxyd, Kalk, Magnesia und Alkalien aus dem Nebengestein läßt auf die Anwesenheit von Kohlensäure in der gangfüllenden Lösung schließen, die reichliche Imprägnation mit Pyrit unter gleichzeitiger Bildung von Kalkspat ist auf die Anwesenheit von Alkalisulfiden gedeutet worden. Neben den metasomatischen Lagerstätten ist der Magnesiagehalt des Kalkes sehr oft bis zur völligen Dolomitisierung angereichert worden, eine Erscheinung, die auch neben den gewöhnlichen Höhlen des Kalksteingebirges sehr allgemein ist und auf der größeren Löslichkeit des kohlensauren Kalkes im Vergleich zur kohlensauren Magnesia in kohlesäurehaltigem Wasser beruht.

Mitunter enthalten die Gangmineralien kleine Einschlüsse von wässerigen Lösungen; in solchen haben sich manchmal Alkalien nachweisen lassen. Ueberlegungen über den Chemismus der Gesteinsumwandlung längs der Erzgänge haben übrigens dazu geführt, den gangfüllenden Lösungen im allgemeinen einen alkalischen Charakter zuzuschreiben. Es versteht sich von selbst, daß bei ihrer Reaktion auf das Nebengestein nicht geringe Stoffmengen aus diesem in jene übergehen müssen, die späterhin wiederum in der Gangspalte zur Mineralbildung beitragen können, wie z. B. Kalk, Magnesia, Eisenoxyd und -oxydul oder Kieselsäure, so daß auch darum die Zusammensetzung der Gangfüllung keinen ganz zuverlässigen Schluß auf die Beschaffenheit der aus der Tiefe emporgestiegenen Lösung erlaubt.

8. Die wichtigsten Erzlagerstätten nach ihrer geographischen Verbreitung.

Manche wichtigere Vorkommnisse und Typen sind bereits als Beispiele in den vorhergehenden allgemeinen Abschnitten angeführt worden, welche deshalb das Nachstehende mehr oder weniger ergänzen werden.

Gold. In früherer Zeit stammte das meiste, in den frühesten Zeiten wohl fast alles Gold aus den Goldseifen; die Suche nach dem begehrten Metalle und die Goldwäscherei ging in allen neu gewonnenen Gebieten der Kulturarbeit voraus.

Goldseifen sind auf der Erde ungemein weit verbreitet, in Europa gegenwärtig völlig erschöpft, in anderen Ländern schon sehr stark ausgebeutet. Ein wenig goldführend sind zahlreiche Flüßchen Thüringens und des Erzgebirges, die Eder, die Donau, der Inn, die Salzach, die Ill, der Rhein usw. Bis in die 90er Jahre des vergangenen Jahrhunderts hat man zwischen Kehl und Mainz ein wenig Gold gewaschen; bei Kehl betrug der Goldgehalt des verwaschbaren Sandes, der sich nach Hochwässern am oberen Ende der Geschiebebänke oder hinter den Uferdämmen absetzte, gewöhnlich nur 13 bis 15 Hundertmillionstel. Auch aus der Donau hat man noch vor 30 Jahren unterhalb Wien Gold gewaschen. Goldseifen wurden in Schlesien bei Löwenberg und Goldberg, in Böhmen bei Eule verarbeitet.

Das meiste im russischen Reiche gewonnene Gold stammt aus den Seifen des östlichen Ural (Beresowsk seit 1813; Gornyschtschit, Isetsk, Nevjansk, Miask seit 1824), des Altai, aus verschiedenen Distrikten West- und Ostsibiriens und neuerdings hat auch das Amurgebiet eine besondere Bedeutung erlangt.

In Australien waren besonders in den 1850 er Jahren die großenteils pliocänen Goldseifen von Viktoria, welche teilweise unter mehrere hundert Fuß dicken Basaltströmen begraben liegen, wegen ihres Reichtumes berühmt. Verschiedene riesige Goldklumpen — der größte, zu Ballarat gefundene wog 70 Pfd. — haben den Golddistrikt berühmt gemacht. Bis 1861 bildete die Goldwäscherei in Viktoria und in Neusüdwales den einzigen Goldbergbau, wozu dann weiterhin noch die Bearbeitung der Goldquarzgänge kam.

Von höchster Wichtigkeit für die Goldproduktion war die im Jahre 1849 erfolgte Entdeckung der Goldseifen Kaliforniens. Sie sind vorzugsweise an tertiäre, bis 2300 m hoch gelegene Flußablagerungen gebunden und waren besonders reich in einem zwischen dem 37. und 40. Breitegrad sich erstreckenden Gebiete; auch hier liegen die goldführenden Schotter teilweise unter alten Lavaströmen. Die Goldführung der jetzigen Flüsse, die zweifellos der Zerstörung der Seifen entstammt, ist verhältnismäßig geringfügig. In neuerer Zeit ergaben einige Jahre lang die im Jahre 1896 entdeckten Goldseifen in den Grenzgebieten zwischen Alaska und Britisch-Kolumbien, insbesondere diejenigen am Klondike-Flusse, sehr reiche Erträge.

Die wichtigsten Golderzlagerstätten der Erde sind jetzt diejenigen am Witwatersrand, einem von Westen nach Osten streichenden Höhenzuge im südlichen Transvaal, mit dem Minenzentrum Johannesburg. In einer streichenden Ausdehnung von rund 90 km sind dort vorwiegend aus Quarzgeröllen bestehende Konglomeratbänke im Liegenden devonischer Schichten goldführend. Man hat jene goldführenden Ablagerungen (bankets oder reefs), die sich mehrfach innerhalb einer aus quarzitischen Sandsteinen, Quarziten, Tonschiefern und Diabasdecken bestehenden Schichtfolge wiederholen, wohl als uralte, gewissermaßen „fossile" Goldseifen erklären wollen. Dem widerspricht aber das Auftreten des Goldes, das sich kaum jemals in den Quarzgeröllen, auch nicht in abgerollten Klumpen und Blättchen vorfindet, wie sie für Seifengold charakteristisch sind; vielmehr ist das Edelmetall aufs innigste gebunden an Schwefelkies im Zement der Konglomerate, dessen Kristalle es wie eine gleichzeitige Bildung durchwächst. Man hat also entweder anzunehmen, daß sich das Metall zur Zeit der Konglomeratablagerung mit dem Pyrit aus Lösungen niedergeschlagen habe, oder daß es später in die Schichten eingewandert sei. Die goldführenden Schichten bilden eine ungefähr 15 km breite Ausstrichzone und fallen nahe der Oberfläche steil, durchschnittlich mit 45 bis 50° nach Süden ein, liegen aber, was für die Zukunft des Bergbaues wichtig ist, schon in der Tiefe von einigen hundert Metern sehr viel flacher. Der Goldgehalt ist in einzelnen Konglomeratbänken ein verhältnismäßig recht gleichbleibender, am höchsten in der Gegend von Johannesburg; eine der reichsten Schichten ergab eine Goldführung bis zu 171 g in 1000 kg.

Das Witwatersrandgold ist erst im Jahre 1885 entdeckt worden; bald darauf wurde die Stadt Johannesburg gegründet. Ihren jetzigen hohen Aufschwung verdankt die dortige Goldindustrie der Einführung des sogenannten Cyanidprozesses, der darauf beruht, daß das im Pyrit fein verteilte Gold durch eine sehr verdünnte Cyankaliumlösung ausgelaugt werden kann. Man hat über den Goldreichtum des Witwatersrandes mehrfach Berechnungen angestellt, Hatch schätzt ihn neuerdings (1910) noch auf rund 20 Milliarden Mark oberhalb von etwa 1800 m Tiefe, bis wohin voraussichtlich der Bergbau ohne übermäßige Schwierigkeiten vordringen kann. Der Wert der jährlichen Goldproduktion des Witwatersrandes beträgt jetzt

Digitized by Google

über 600 Mill. M.; bis 1911 belief sie sich insgesamt auf 5,3 Milliarden M.

Golderzgänge sind auf der ganzen Erde sehr weit verbreitet; auf ihnen tritt das Edelmetall immer nur in geringen, mitunter überhaupt kaum sichtbaren Mengen auf, während der mineralogische Charakter der Gänge durch weitaus überwiegende sonstige Erze, insbesondere Sulfide, wie Pyrit, Kupferkies, Antimonit, Silbererze, Bleiglanz und Zinkblende bestimmt sein kann. Ein sehr häufiger Typus sind die sogenannten Goldquarzgänge; Quarz ist darin die einzige oder vorherrschende Gangart, Haupterz ist güldischer Pyrit, daneben kommt auch Freigold vor. Recht häufig ist eine genetische Beziehung zu Granitintrusionen zweifellos.

Die in Deutschland, z. B. zu Reichmannsdorf in Thüringen, zu Freiwaldau in Schlesien und zu Goldkronach im Fichtelgebirge auftretenden Goldquarzgänge haben keine Bedeutung mehr. Etwas wichtiger sind die goldführenden Quarzantimonitgänge von Mileschau in Böhmen, die Gänge von Eule und Roudny, gleichfalls in Böhmen, und die ziemlich silberhaltigen Golderzgänge der Hohen Tauern bei Gastein, wo noch jetzt ein in entfernte Zeiten zurückreichender Bergbau getrieben wird, während die Goldgewinnung am Heinzenberg bei Zell im Zillertal erlegen ist. Andere alpine Golderzgänge sind z. B. die am Monte Rosa.

Die goldführenden Arseneisenlagerstätten von Reichenstein in Schlesien, die alljährlich etwa 50 kg Gold liefern, sind keine Golderzgänge, sondern scheinbar sehr eigenartige Kontaktlagerstätten; die Erze sind dort an Serpentin gebunden, der durch Kontaktmetamorphose aus dolomitischem Kalkstein entstanden sein dürfte.

Der berühmteste Golderzgang der Vereinigten Staaten ist der „Mother lode" („Muttergang") in Kalifornien. Er ist ein Goldquarzgang von der Art der zusammengesetzten Gänge, d. h. die mächtige Mineralisation einer Zerrüttungszone, die sich längs des westlichen, mittelgebirgsartigen Abfalles der Sierra Nevada mit einer mehrere hundert Meter erreichenden Breite ungefähr 180 km weit verfolgen läßt.

Der Mother lode bietet ein vorzügliches Beispiel für die sekundäre Veredelung der Golderzgänge im Ausstrich: während um 1850 die Tonne (1000 kg) Goldquarz noch für 300 bis 800 M. Gold enthielt und in geringen Tiefen noch Goldmassen bis zu 43 kg Gewicht auftraten, beträgt jetzt der Goldwert einer Tonne des Goldquarzes nur mehr 40 bis 55 M., entsprechend einem Gehalte von 15 bis 20 g Gold.

Der früheste Goldbergbau in den Vereinigten Staaten fand seit Ende des 18. Jahrhunderts in den Alleghanies statt.

Von brasilianischen Goldquarzen seien diejenigen von Morro Velho und Passagem in Minas Geraes erwähnt. Bemerkenswert sind auch die mit Gold imprägnierten Eisenglimmerschiefer (Itabirite) von Ouro Preto; das Gold enthält hier merkwürdigerweise bis zu 8% Palladium und wird von etwas Platin begleitet.

Die wichtigsten Goldquarzgänge Australiens sind diejenigen von Ballarat und Bendigo in Viktoria, andere werden in Neusüdwales abgebaut und in Queensland hatte die Goldlagerstätte am Mount Morgan einen Ruf wegen des ungeheuren Goldreichtums im verwitterten Ausstrich: dieser ergab noch im Jahre 1887 181½ g Gold in der Tonne, je weiter man jedoch in die Tiefe drang, desto mehr nahm der Goldgehalt ab und betrug z. B. 1903 nur mehr 15 g, dabei wurde die Lagerstätte immer kupferreicher.

Den Goldquarzgängen stehen gewisse Tellurgoldgänge mineralogisch ziemlich nahe; andere zeigen eine Aehnlichkeit mit den weiter unten zu erwähnenden Goldsilbererzgängen. Letzterer Art sind die Tellurgoldgänge von Nagyág in Siebenbürgen, welche vor den Goldsilbererzgängen desselben Gebietes durch das Einbrechen von Schrifterz (Sylvanit) und Nagyagit ausgezeichnet sind. Es sind sehr wenig mächtige Klüfte in einem „propylitisierten" d. h. grünsteinartig umgewandelten Dazitdurchbruch tertiären Alters. Die seit 1891 bekannten Tellurgoldgänge im Cripple Creek Distrikt am Südwestabhang des Pikes' Peak in Colorado führen als Haupterz Calaverit, als Gangart spielt neben Quarz und Dolomit violetter Flußspat eine bemerkenswerte Rolle. Cripple Creek war von 1891 bis 1906 einer der reichsten Golddistrikte der Erde. Bis 1905 wurde dort für rund 650 Mill. M. Goldwert produziert. Weitere sehr reiche Tellurgoldgänge sind diejenigen von Kalgoorlie in Westaustralien, 600 km landeinwärts von Perth; es sind zusammengesetze Gänge in Dioriten, Amphiboliten, Pyroxeniten u. dgl.

Auf den Goldsilbererzgängen tritt das Gold oft in Begleitung von edlen Silbererzen und meistens mit größeren Mengen der gewöhnlichen Sulfide, dazu mit Quarz, Kalkspat und anderen Karbonaten, stellenweise auch mit Schwerspat, Rhodonit usw. auf. Dieser Gangtypus hat seine hauptsächlichste Verbreitung im Bereich von andesitischen, rhyolithischen und dazitischen Massendurchbrüchen tertiären Alters und ihrer näheren Umgebung.

Die Gänge des wichtigsten europäischen Golderzdistriktes, nämlich die Goldsilbererzlagerstätten Ungarns (und Siebenbürgens) sind dieser Art. Sie sind über eine Entfernung von mehreren hundert Kilometern längs der tertiären Durchbrüche am Innenrande

Digitized by Google

des Karpathenbogens von Schemnitz und Kremnitz bis nach der Maros im Südosten des Königreichs verbreitet. Gewöhnlich sind sie durch eine große Mannigfaltigkeit der Mineralführung ausgezeichnet; das Mengenverhältnis zwischen der Silber- und Goldführung ist in den verschiedenen Distrikten ein verschiedenes, manche Gänge können geradezu als goldarme Silbererzgänge bezeichnet werden. Längs des Karpathenbogens folgen die wichtigsten Reviere folgendermaßen: Schemnitz-Hodritsch, Kremnitz im Flußgebiete der Gran; Nagybánya, Felsöbánya, Kapnik, Rota und Oláhláposbánya im Flußgebiete der Szamos; im siebenbürgischen Erzgebirge sind die wichtigsten Grubenreviere diejenigen von Verespatak, Bucsum, Botes, Boicza und vor allem auch Muszári und Ruda. Die Nagyáger (vgl. oben) Gänge sind hingegen teilweise Tellurgoldgänge. In Siebenbürgen wurde schon zur Zeit der römischen Herrschaft ein umfangreicher Goldbergbau getrieben und zweifellos reicht z. B. auch die Goldgewinnung von Schemnitz weit zurück ins Mittelalter. Die ungarische Goldproduktion beträgt jetzt nur mehr etwa 3300 kg im Jahre.

Vor ungefähr 40 Jahren stand die Minenstadt Virginia City in Nevada wegen des enormen Reichtums der dortigen Gruben in hohem Rufe. Die Lagerstätte, der Comstockgang, ist ein etwa 7 km langer und an der Oberfläche bis zu 300 m mächtiger zusammengesetzter Goldsilbererzgang. In den geringeren Tiefen zeigte er eine reiche sekundäre Veredelung, ganz besonders in einer Anzahl unregelmäßig gestalteter Erzmittel, den sogenannten „Bonanzas". Der Comstockgang wurde 1859 entdeckt; die höchste Produktion erreichte Virginia City im Jahre 1876 mit 162 Mill. M. an Gold- und Silberwert. Bis 1882 hat der Gang rund 1300 Mill. M., davon 53% an Silber- und 43% an Goldwert ergeben. Im Jahre 1881 kam der Bergbau dadurch fast vollständig zum Erliegen, daß in der Tiefe von 900 m heißes Wasser einbrach. Auch der Comstockgang hat als Nebengestein grünsteinartig veränderten („propylitisierten") Andesit. Sehr reich an Goldsilbererzgängen ist Colorado. Gutenteils treten sie hier nicht in Verbindung mit jüngeren Eruptivgesteinen sondern in kristallinen Schiefern, Gneis, Granit, Porphyr usw. auf. Eine gewisse Aehnlichkeit mit dem Comstockgang besitzen die in Andesit aufsetzenden, im Jahre 1900 entdeckten Gänge von Tonopah, andere sind die gleichfalls erst in neuester Zeit entdeckten, hauptsächlich an Dazit gebundenen Gänge von Goldfield, 45 km weiter südlich, beide haben gegenwärtig eine große Bedeutung für die amerikanische Gold- und Silberproduktion.

Wiederum an tertiäre Eruptivgesteine gebundene Goldsilbererzgänge werden östlich von der Stadt Auckland auf Neuseeland im Hauraki-Goldfeld abgebaut.

Die wichtigsten Goldproduzenten der Erde waren im Jahre 1910 folgende:

Transvaal	mit	235 000 kg
Vereinigte Staaten	„	144 500 kg
Australien	„	98 300 kg
Rußland	„	60 500 kg
Mexiko	„	36 200 kg
Rhodesien	„	19 000 kg

Silber. Ein sehr großer Teil des Silbers wird bei der Verhüttung des silberhaltigen Bleiglanzes der Bleiglanzgänge gewonnen. Auch der eiserne Hut der metasomatischen Bleiglanzlagerstätten war stellenweise sehr reich an sekundären Silbererzen, wie z. B. an Halogensilberverbindungen und gediegenem Silber, während der Bleiglanz derselben Lagerstätten in der Tiefe auffallend silberarm zu sein pflegt. Zu den hauptsächlichsten Silberlagerstätten gehören die schon erwähnten Goldsilbererzgänge; ganz besonders sei erinnert an den Comstockgang, dessen enorme Ausbeute wesentlich zur Entwertung dieses Metalles beigetragen hat. Auch der späterhin noch zu erwähnende Mansfelder Kupferschiefer kann noch jetzt als eine wichtige Silberlagerstätte gelten.

Mit einer alten Freiberger Bezeichnung meint man mit der Bezeichnung „edle Quarzformation" solche Gänge, welche neben den stets vorhandenen gewöhnlichen Sulfiden, wie Pyrit, Kupferkies, Bleiglanz, Zinkblende usw. reichlich edle Silbererze, nämlich Silber, Silberglanz, Rotgültigerz, Stephanit u. a. m. mit vorwiegendem Quarz als Gangart führen. Ein anderer mehrfach wiederkehrender Gangtypus sind die Kalkspatsilbererzgänge, auf denen neben der vorhin genannten Gangfüllung sehr reichlicher Kalkspat auftritt, wie z. B. auf den durch ihren großen Mineralreichtum berühmten Gängen von St. Andreasberg im Harz; der dortige Bergbau ist vor kurzem eingestellt worden. Viel mineralogische Aehnlichkeit mit den Andreasberger Gängen haben diejenigen zu Kongsberg im südlichen Norwegen; das Haupterz ist dort Silberglanz, aus welchem die prachtvollen, in allen Sammlungen verbreiteten zahn- und drahtförmigen Bildungen gediegenen Silbers hervorgegangen sind. Die wenig mächtigen Gänge sind nur dort edel, wo sie die sogenannten Fahlbänder, d. s. mit allerlei fein verteilten Sulfiden, insbesondere mit Pyrit und Magnetkies imprägnierte Schiefereinlagerungen, durchschneiden.

In Deutschland ist der eigentliche Silberbergbau wegen des Preissturzes, den das Metall vor ungefähr 20 Jahren erlitten hat, so gut wie erloschen. Zu Freiberg in Sachsen

Digitized by Google

konnte nur ein Teil der Erzgänge als eigentliche Silbererzgänge bezeichnet werden, die übrigen waren in mineralogischer Beziehung in der Hauptsache Bleiglanz- und z. T. auch Zinkblendegänge. Bis in die letzten Jahre bestand dort auf verschiedenen, im weiteren und näheren Umkreis der Stadt gelegenen zumeist in Gneis aufsetzenden Gängen (Fig. 6, 7) der „edlen Quarzformation" Silberbergbau; durch besonderen Adel aber zeichneten sich die nach ihrem mineralogischen Charakter den Kalkspatsilbererzgängen nahestehenden „edlen Braunspatgänge" aus, denen hauptsächlich die Grube Himmelsfürst ihren Reichtum verdankte. Sie war berühmt wegen ihrer ausgezeichneten Mineralfunde und des gelegentlichen Vorkommens massenhaften gediegenen Silbers. Die sehr zahlreichen Gänge der sogenannten „kiesigen Bleiformation" (Haupterze: silberhaltiger Bleiglanz, Pyrit, Zinkblende, Kupferkies und Arsenkies) in der unmittelbaren Nähe der Stadt sind an sich nicht silberreich, die Schleppungskreuze zwischen zwei Gängen dieser Art oder mit solchen der edlen Braunspatformation waren aber Stellen sehr reicher Veredelungen und ergaben den Gruben Himmelsfürst und Himmelfahrt jahrelang sehr reiche Ausbeuten. Die im Jahre 1847 angetroffene Silbermasse von 675 kg Gewicht entstammte einer solchen Schleppung. Die z. T. sehr mächtigen Gänge der „barytischen Bleiformation" führten als Haupterz zwar nur Bleiglanz mit niedrigem Silbergehalt, stellenweise aber auch edle Silbererze in Begleitung von Kobalt, Nickel, Wismut usw. Der bedeutendste Gang dieser Art war der etwa 8½ km weit verfolgte, von der Grube Churprinz abgebaute „Halsbrücker Spat". Der Ursprung des Freiberger Silberbergbaues wird in die Zeit der Regierung des Markgrafen Otto zu Meißen zwischen 1162 und 1170 verlegt. Die höchste Silberproduktion fällt in das Jahr 1884 (über 35000 kg).

Die gesamte Silberproduktion Freibergs von 1163 bis 1900 gibt H. Müller zu rund 5400000 kg im Werte von über 900 Mill. M. an. Der seit Jahren nicht mehr lohnende Bergbau ist in der letzten Zeit so weit zurückgegangen, daß er im Jahre 1913 gänzlich eingestellt werden wird.

Die zeitweise wegen ihres Silberreichtums und ihrer schönen Mineralien bekannten erzgebirgischen Gruben von Marienberg, Annaberg und Johanngeorgenstadt sind teils aufgelassen, teils bedeutungslos geworden. Sie bauten auf Gängen, auf denen neben den edlen Silbererzen auch Kobalt- und Nickelerze samt etwas Wismut einbrachen. Zu Schneeberg wird aus solchen Gängen jetzt noch Kobalt für die dortige Blaufarbenfabrikation gewonnen, die im Erzgebirge im Jahre 1540 erfunden wurde. Die in mineralogischer Hinsicht ganz ähnlichen Silbererzgänge von Joachimsthal an der sächsisch-böhmischen Grenze sind wichtige Lagerstätten des Uranpecherzes, das sich in kleinen Mengen übrigens auch auf den vorher genannten Gängen und zu Freiberg findet.

Der Silberbergbau im Kinzigtal im Schwarzwald und zu Markirch im Elsaß gehört der Vergangenheit an.

In den Vereinigten Staaten von Nordamerika hat die Silberproduktion mit dem Preissturze des Silbers und vor allem seit dem Erliegen der Minen von Virginia City recht an Bedeutung abgenommen. Zahlreiche Gruben des Westens fördern noch neben Gold auch Silber. In Colorado und Nevada waren wie in Südamerika die eisernen Hüte mancher metasomatischer Lagerstätten und Bleierzgänge reiche Silberlagerstätten: so diejenigen von Leadville, wo man zur Zeit der ersten Blüte 1877 bis 1884 außer 3200 kg Gold 1600000 kg Silber gewonnen hat, oder zu Aspen. Sehr reich war der jetzt fast verlassene Eurekadistrikt, wo zwischen 1868 und 1883 neben 225000 Tonnen Blei nicht weniger als 250 Mill. M. an Gold und Silber gewonnen worden sind. Gegenwärtig ist neben Colorado der Staat Idaho der hauptsächlichste Silberproduzent; die wichtigsten Lagerstätten sind dort die sehr reichen silberhaltigen Bleierzgänge von Coeur d'Alene. Seit einigen Jahren sind die Kobaltsilbererzgänge bei Cobalt in Ontario (Canada) für die Silberproduktion von wesentlicher Bedeutung geworden.

Das Silberland der heutigen Zeit ist immer noch Mexiko. Auf dem Hochlande folgen sich zahlreiche Minendistrikte von Oaxaca bis in den Staat Chihuahua. Die Silberlagerstätten sind an die tertiären Eruptivgesteine oder an deren Nähe gebunden. Nach ihrer mineralogischen Zusammensetzung haben sie viel Aehnlichkeit mit den Goldsilbererzgängen, von denen sie sich im allgemeinen durch ihren geringen Goldgehalt unterscheiden. In ausgezeichneter Weise zeigten sie die sekundäre Veredelung der oberen Teufen; die teilweise aus Eisen- und Manganoxyd bestehenden, an Chlor- und Bromsilber und Gold reichen Ausstriche bezeichnet man hier als „quemazones", die in der Tiefe folgenden, unedleren sulfidischen Erze als „negros". Bald nach der Eroberung des Landes wurden die Silbererzgänge von Pachuca und Real del Monte, etwa 100 km von der Hauptstadt, entdeckt; zu Pachuca erfand Bartolomé de Medina 1557 das so wichtig gewordene Amalgamationsverfahren (den sogenannten Patioprozeß). Seine höchste Blüte hatte jener Distrikt am Ende des 18. Jahrhunderts; 1780 soll Real del Monte allein für 44 Mill. M. Silber ergeben haben. Zu Guanajuato, 300 km

Digitized by Google

nordwestlich von der Stadt Mexiko, ist die Veta Madre einer der größten und reichsten Erzgänge der Erde; die berühmte Grube Valenciana ergab zwischen 1788 und 1824 für 137 Mill. M. Silber; seit Ende des 16. Jahrhunderts bis zu Humboldts Zeit soll man aus der Veta Madre schon für 1600 Mill. M. Silber gefördert haben. Etwa 200 km weiter nördlich liegt der im Jahre 1546 entdeckte Gangdistrikt von Zacatecas; zahlreiche andere sind im mittleren und nördlichen Teil der Republik zerstreut. Die mexikanische Silberproduktion beträgt jährlich über 2 Mill. kg.

In Südamerika sind besonders Peru und Bolivien reich an Silbererzlagerstätten. In Peru sollen die im Jahre 1630 entdeckten Lagerstätten am Cerro de Pasco für 1,5 Milliarden M. Silber gegeben haben.

In Bolivien führen zahlreiche über einen mehr als 800 km langen Landstrich verbreitete Erzgänge neben edlen Silbererzen, Sulfiden und Sulfosalzen von Kupfer, Eisen, Zink und Blei auch Zinnerz mit seinen gewöhnlichen Begleitern Wolframit und Wismut, aber höchstens ganz untergeordnet auch mit den für die Zinnerzvorkommnisse anderer Gegenden so wesentlichen fluor- und borhaltigen Gangarten. Die Gänge stehen in naher Beziehung zu kieselsäurereichen Eruptivgesteinen. Ihr Silbergehalt war in früheren Zeiten ein ganz enormer und ihm verdankten besonders die um die Mitte des 16. Jahrhunderts gegründeten Städte Potosí und Oruro ihren hohen Ruhm. Die Silberausbeute zu Potosí wird für die Jahre von 1545 bis 1803 zu 5480 Mill. M. angegeben. Das bolivianische Zinnerz hat wegen der Transportverhältnisse im Lande noch nicht die volle Bedeutung errungen. Im südlichen Teile der Republik liegen die großen Hüttenwerke von Huanchaca und der Minendistrikt von Pulacayo; das Hauptsilbererz der dortigen Gänge ist Silberfahlerz.

Im nördlichen Chile waren in den 70er Jahren die Silbergruben von Chanarcillo und Caracoles durch das reiche Vorkommen von gediegen Silber und von Silberhalogenverbindungen im eisernen Hute ausgezeichnet.

Das jetzt auf Blei, Zink und Silber bearbeitete Erzlager von Brokenhill, 480 km von Adelaide in Neusüdwales, bot nach seiner Entdeckung im Jahre 1883 ein ausgezeichnetes Beispiel für die sekundäre Anreicherung von Silbererzen infolge der Verwitterung von silberarmem Bleiglanz. Der eiserne Hut und die Zone der reichen Konzentrationen reichten bis zur Tiefe von ungefähr 100 m, Weißbleierz und sekundäre Kupfererze sowie zahlreiche andere Neubildungen waren so durchsetzt mit Chlor-, Jod- und Bromsilber sowie gediegenem Silber, daß die Massen, besonders auch das kaolinisch zersetzte Nebengestein bis über 1% des Edelmetalles enthielten. Das frische Erz besteht hauptsächlich aus Bleiglanz und Zinkblende, enthält nebstdem viel Quarz, Granat und Rhodonit und bildet eine lagerartige Masse in kristallinen Schiefern.

Es produzierten im Jahre 1910:

Mexiko	2 260 000	kg Silber	
Ver. Staaten	1 760 000	„ „	
Australien	450 000	„ „	
Peru	200 000	„ „	
Canada	1 000 000	„ „	
Bolivien	218 000	„ „	
Deutschland	420 000	„ „	fast ausschließlich aus importierten Erzen.
Belgien	265 000	„ „	fast ausschließlich aus importierten Erzen.

Quecksilber. Das wichtigste Quecksilbererz, neben welchem sich das gediegene Quecksilber immer nur in untergeordneter Menge findet, ist der Zinnober. Als eigentliche Quecksilberlagerstätten werden solche bezeichnet, auf welchen dieses Erz, gewöhnlich fast ohne alle anderen Begleiter, mit Ausnahme von Pyrit oder Markasit, und mit wechselnden Gangarten auftritt. Träger der Quecksilberlagerstätten können die verschiedensten Gesteine sein. Einigermaßen mächtige Zinnobergänge sind kaum bekannt; gewöhnlich tritt das Erz vielmehr als Imprägnation in zerrütteten Gesteinen auf, worin seine Ansiedelung nicht selten auffällige metasomatische Erscheinungen mit sich gebracht hat.

Die an permische Gesteine gebundenen Zinnoberlagerstätten in der Rheinpfalz (Zweibrücken) sind seit Jahrzehnten verlassen. Wenig bedeutend sind die in karbonischen Sandsteinen und Kohlenflözchen auftretenden Lagerstätten von Nikitowka in Rußland und diejenigen in einem Serpentin am Avalaberg, 20 km südlich von Belgrad. Die ältesten und immer noch sehr ergiebigen Quecksilberlagerstätten von Almadén am Nordabhang der Sierra Morena finden sich hauptsächlich in einem sehr festen devonischen Quarzit; man baut drei 8 bis 10 m mächtige, in Tonschiefer eingelagerte mit Zinnober imprägnierte Quarzitmassen ab.

Zu Idria in Krain besteht schon seit 1490 Quecksilberbergbau. In dem durch bedeutende Ueberschiebungen und Faltungen gestörten Gebiete bilden bald Dolomite und Dolomitbreccien des Muschelkalkes, bald bituminöse Sandsteine und Tonschiefer der unteren Trias die Träger der Erzimprägnationen. Der Zinnober ist mehr oder weniger mit Kohlenwasserstoffen verunreinigt (Stahlerz, Quecksilberlebererz); als Korallenerz bezeichnet man die an Brachiopoden reichen, mit Zinnober imprägnierten Schiefer.

Ein nicht unwichtiger Quecksilberdistrikt liegt nahe dem Monte Amiata in Toskana; verschiedene Gesteine sind dort in den

Digitized by Google

ziemlich zahlreichen Gruben die Träger der Erzführung; zu Siele (Fig. 8). sind es tonige eocäne Kalke („Alberese"), zu Abbadia solche des Lias.

Die ergiebigste Quecksilberregion der Erde war vor etwa 35 Jahren der Westabfall der Sierra Nevada in Kalifornien, zwischen dem 34 ½. und 39. Breitegrad. Das Erz bildet teilweise sehr reiche Imprägnationen in metamorphen Schiefern, Sandsteinen, Serpentin usw. oder auch in jüngeren Basalten. Die reichste Grube ist New Almaden; die größte dort abgebaute mit Zinnober imprägnierte Gesteinsmasse hatte eine Länge von 800, eine Breite von 200 und eine Dicke von 15 Fuß. Kalifornien hatte seine höchste Quecksilberproduktion mit 2755 Tonnen im Jahre 1877; jetzt ist sie auf den fünften Teil herabgesunken.

Seit 1899 findet auch im Terlinguadistrikt in Texas Quecksilberbergbau statt; in mineralogischer Beziehung haben die dortigen Gruben wegen des Vorkommens von einigen sekundären Quecksilbererzen, nämlich: Terlinguait (Hg_2ClO), Kleinit (Quecksilberammoniumchlorid mit Oxychlorid und Sulfat), Eglestonit (Hg_4Cl_2O) und Montroydit (HgO) Interesse erhalten.

Die Quecksilberproduktion betrug 1909 in

Spanien	1393 t
Italien	771 t
Oesterreich	637 t
Vereinigte Staaten	713 t
Mexiko	200 t
Ungarn	80 t
Rußland (1908)	49 t

Platin. Das Platin dürfte sich auf primärer Lagerstätte, abgesehen von seinem sehr spärlichen Vorkommen auf brasilianischen Golderzgängen, lediglich in peridotitischen Gesteinen finden, worin es in sehr geringer Menge als magmatische Ausscheidung auftritt. Aus diesen Gesteinen gelangte es in die Platinseifen.

Für die Platinproduktion kommen nur zwei Gebiete in Betracht: erstlich die Platinseifen im Osten des mittleren Ural in den Distrikten Nischne Tagilsk, Bissersk und Goroblagodat, und zweitens diejenigen im Chocodistrikt in der Republik Columbia.

Am Ural wird das Platin am Boden alter Flußablagerungen unter Torf und mehr oder weniger platinfreien Geschiebemassen angetroffen; stellenweise ist es von Seifengold begleitet, das aber jedenfalls von anderen primären Lagerstätten herrührt. Der größte bisher gefunde Platinklumpen stammte vom Berge Solowieff und wog 9,6 kg. Das Metall hat einen bis zu 18% betragenden Eisengehalt und wird zudem von Iridium, Rhodium, Palladium, Osmium und ein wenig Kupfer verunreinigt; Iridosmium und Osmiridium findet sich neben dem Platin auf den Seifen. Infolge des gesteigerten Bedarfes und des dadurch außerordentlich gestiegenen Wertes des Edelmetalles mußten die längst verwaschenen Seifen wiederholt verwaschen werden; der geringste Platingehalt der verwaschenen Seifen beträgt heute 2,5 g in 1000 kg Geschiebe, um ein vielfaches weniger als in der Zeit der ersten Platingewinnung in den 1820er Jahren. Der Ural soll im Jahre 1909 rund 6000 kg Platin ergeben haben.

Sehr geringe Mengen Platin werden gegenwärtig in Britisch-Columbien aus dem Tulameenfluß (etwa 1 kg im Jahr), in Neusüdwales und Borneo (je 15 kg) gewonnen. Im übrigen kommt als wesentlicher Platinproduzent nur noch die Republik Columbia in Betracht, wo im Jahre 1909 noch ungefähr 180 kg gewaschen wurden. Man entdeckte dort das Edelmetall 1735, warf es aber später, um Fälschungen der Silberlieferungen zu hintertreiben, ins Meer.

Kupfer. Kupferkies und Fahlerz sowie sekundäre Kupferverbindungen treten in untergeordneter Menge auf sehr vielen Lagerstätten auf und werden dann gelegentlich auch verhüttet. Sehr mannigfaltig ist die geologische Natur der eigentlichen Kupfererzlagerstätten.

Der wichtigste Kupferbergbau Deutschlands ist derjenige um Mansfeld östlich vom Harz. Das Erz ist der Kupferschiefer, d. i. ein schwarzer, sehr bituminöser Mergelschiefer mit einem feinverteilten Gehalt an Sulfiden, insbesondere auch solchen des Kupfers (die sogenannte Speise). Im allgemeinen bildet er in seiner weiten Verbreitung am Harzrand, am Nord- und Südabfall des Thüringer Waldes und in Hessen einen wenig mächtigen Schichtenkomplex an der Basis des Zechsteins; doch finden sich in einigen Gegenden kupferführende bituminöse Schichten auch in etwas höheren Zechsteinhorizonten. An sehr vielen Stellen der Provinz Sachsen, Kurhessens, Hannovers und Thüringens hat früher Kupferschieferbergbau bestanden; jetzt wird der Schiefer nur mehr in der Mansfelder Gegend abgebaut, wo er auch einen bemerkenswerten Silbergehalt besitzt. Seine Lagerung ist dort im ganzen diejenige einer nach Osten zu geöffneten, vom oberen Zechstein und Buntsandstein verdeckten Mulde; im westlichen, südlichen und nördlichen Muldenausstrich ist er schon vor Jahrhunderten abgebaut worden, während der neuere Bergbau mit tiefen Schächten nach dem Muldeninneren vorgerückt ist. Der Kupferschiefer ist bei Mansfeld etwa 50 cm mächtig; von unten nach oben nimmt im allgemeinen der Kupfer- und Silbergehalt so ab, daß gegenwärtig nur die untersten insgesamt 15 cm dicken Lagen die Verhüttung lohnen. Der

Digitized by Google

Kupfergehalt beträgt darin 2 bis 3‰, der Silbergehalt 0,010 bis 0,015‰, d. h. es kommen nur etwa 5 kg Silber auf 1000 kg Kupfer. Die Erzführung wird bald in günstiger bald in ungünstiger Weise durch die mannigfachen als „Rücken" bezeichneten Flözstörungen beeinflußt. So weit längs der Rücken, die meistens Verwerfer darstellen, eine Veredelung der gestörten Schichten stattgefunden hat, bilden diese Teile der Lagerstätte den wesentlichen Gegenstand der Gewinnung. Der Mansfelder Bergbau reicht wohl mindestens bis ins 12. Jahrhundert zurück. Die 1852 gegründete Mansfeldsche Gewerkschaft ist eine der großartigsten industriellen Unternehmungen Deutschlands. Sie produziert jährlich gegen 20000 t Kupfer und 100000 kg Silber.

Nach allgemeiner Annahme hat schon im Jahre 972 auf dem Erzlager im Rammelsberg bei Goslar am Harz Bergbau bestanden (Fig. 10). Dieses bildet eine ungefähr 1200 m weit verfolgte, in unbekannte Tiefe hinabreichende Einlagerung in den mitteldevonischen Wissenbacher Schiefern, die dort in überkippter Lagerung unter 40 bis 50° nach dem Gebirge einfallen. Die Mächtigkeit des Lagers ist durch Pressungen und Faltungen sicherlich stark verändert worden, mag aber ursprünglich 2 bis 3 m betragen haben. Im wesentlichen besteht es aus einem innigen Gemenge von Schwefelkies, Kupferkies, Bleiglanz, Zinkblende und Schwerspat, welche im großen ganzen neben einer feinen Bänderung im kleinen auch eine lagenförmige Verteilung erkennen lassen, derart daß kupferreiche Erze im ursprünglichen Liegenden, Bleiglanz, Zinkblende und Schwerspat im ursprünglichen Hangenden vorwalten. In den kupferreichsten Erzen beträgt der Kupfergehalt gegen 16%.

Zu Stadtberge im südlichen Westfalen werden Imprägnationen von oxydischen Kupfererzen, Kupferglanz und Buntkupfererz in einem sehr stark zerklüfteten, brüchigen Kulmschiefer abgebaut. Das Vorkommen ist an einen bestimmten Horizont der Kulmschiefer gebunden und deshalb scheinbar ein lagerartiges.

Quarzreiche Kupfererzgänge hat man früher in der näheren und weiteren Umgebung Freibergs, ferner zu Kupferberg in Schlesien, südlich und östlich des Siebengebirgs (z. B. bei Rheinbreitbach), ferner bei Dillenburg in Nassau abgebaut. Zu Lauterberg am Harz führten die Kupfererzgänge Schwerspat und prächtigen gelben Flußspat. Verschiedene Kupferkiesgänge mit bald mehr quarziger, bald mehr karbonatischer Gangart finden sich in den kristallinen Schiefern vom Inntal in Tirol bis südlich von Salzburg; zu ihnen gehören die jetzt unbedeutenden Kupferlagerstätten von Mitterberg am Hochkönig, die zufolge von Altertumsfunden schon in der Bronzezeit bearbeitet worden sind. Der Kupferbergbau zu Schwaz in Tirol, der jetzt fast ganz erloschen ist, hatte im Besitz der Fugger im 16. Jahrhundert eine hohe Blüte; die Lagerstätten sind dort hauptsächlich metasomatische Einlagerungen von Fahlerz in Dolomit.

Die kupferreichste Provinz Italiens ist Toskana. Uralt war der Bergbau auf den jetzt verlassenen Kontaktlagerstätten von Campiglia marittima gegenüber Elba. Die Kupfergrube Monte Catini bei Volterra mag

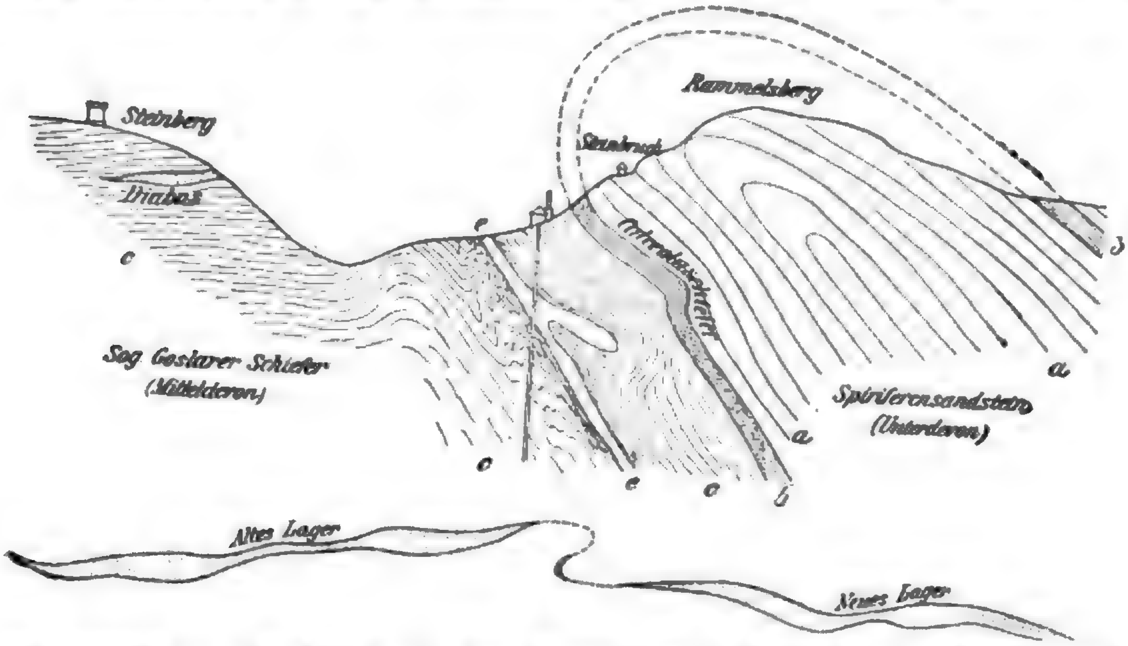


Fig. 10. Profil und Grundriß durch das Rammelsberger Kieslager. a Spiriferensandstein, b Calceolaschiefer, c Wissenbacher (Goslarer) Schiefer, e Erzlager. Nach Klockmann.

gleichfalls schon den Etruskern Kupfer geliefert haben; sie hatte eine große Blüte um die Mitte des vorigen Jahrhunderts, kann aber jetzt als erschöpft gelten. Massen von reinem Kupferkies, der in den oberen Teufen in reichere Sulfide und gediegen Kupfer umgewandelt war, bildeten ursprünglich Spaltenfüllungen in einem Diabas. Durch spätere Gebirgsbewegungen waren sie teilweise zu Reibungskonglomeraten d. h. kugelförmigen Einlagerungen von jeglicher Größe inmitten eines grünen lettigen Gesteins zerrieben worden. Ein nennenswerter Kupferbergbau besteht jetzt nur mehr in der Umgebung von Massa Marittima. Die teilweise recht mächtigen Kupferkiesquarzgänge erfüllen Verwerfungsspalten zwischen eocänen oder eocänen und permischen Schichten; merkwürdigerweise hat längs solcher Gänge eine Umwandlung des Nebengesteines nach Art der Kontaktmetamorphose stattgefunden.

Der uralte Kupferbergbau der Insel Cypern, von welcher sich angeblich das Wort cuprum herleiten soll, ist sozusagen verschollen. Außer massenhaften Schlacken weist nur da und dort im Süden der Insel noch ein schmaler in Diabas aufsetzender Kupferkiesgang auf den antiken Bergbau hin.

Auch zu Rio Tinto in der südspanischen Provinz Huelva reicht der Bergbau, jetzt der wichtigste Kupferbergbau Europas, bis in das frühe Altertum zurück. Die dortigen Kieslager bilden Einlagerungen in der Kulmformation; in ihrer Nachbarschaft treten Eruptivgesteine und für Tuffablagerungen gehaltene Gesteine auf. Man kennt über 50 solche Lagerstätten innerhalb einer 200 km langen, bis nach S. Domingos in Portugal reichenden, 20 km breiten Zone; die bedeutendsten bei Rio Tinto abgebauten Kieslager haben Längen bis zu mehr als 1000 m und teilweise 80 m durchschnittliche Mächtigkeit. In der Hauptsache herrscht Schwefelkies, der Kupfergehalt schwankt, beträgt aber in der Regel nur 3 bis 4%. Schon die Phönizier scheinen zu Rio Tinto Bergbau getrieben zu haben.

Im schwedischen Gneisgebirge sind mehrfach Kieslager bekannt; die wichtigsten werden seit etwa 600 Jahren zu Falun, nordwestlich von Upsala, abgebaut. Die Erzlager bestehen aus sehr viel Quarz mit etwas Glimmer, Cordierit, Granat, Amphibol usw., die innig verwachsen sind mit Pyrit, Magnetkies, Kupferkies und etwas Zinkblende. Sie bilden stockförmige, schon in der Tiefe von einigen hundert Metern endigende Einlagerungen im Gneis, von dem sie durch die sogenannten Skölar (= Schalen), wahrscheinlich umkristallisierte und mineralisierte Quetschzonen, geschieden sind. Falun hatte seine höchste Blüte in der Mitte des 17. Jahrhunderts; heute sind seine Kieslager fast erschöpft.

Eine große Anzahl von Kieslagern ist in den kristallinen Schiefern Norwegens bekannt. Sie finden sich längs der Westküste etwa zwischen dem 59. und 67. Breitegrad. Als Lagerart tritt hier der Quarz mehr zurück, häufig sind Silikate wie Strahlstein, Chlorit, Glimmer, Diopsid, Granat, Zoisit und Epidot, d. h. die auch in den umschließenden Muttergesteinen verbreiteten Bestandteile. In der Nachbarschaft der Lager sind massige, als Gabbros bezeichnete Gesteine verbreitet; man hält sie für intrusiv und will mit ihrer Intrusion die Kieslager als epigenetische Injektionen in Verbindung bringen. Wichtigere Kieslager Norwegens sind die eigenartigen „Kieslineale“ von Röros südöstlich von Trondhjem und am Sulitelma östlich von Bodö.

Im Ural waren die Kontaktlagerstätten von Bogoslowsk an der Turja und von Mednorudiansk bei Nischne Tagilsk in früheren Zeiten wegen des großen Reichtums ihrer Ausstriche bekannt. Mednorudiansk lieferte große Mengen des edlen, seither viel verarbeiteten Malachits.

In England waren die Kupfererzgänge von Cornwall, welche eine kupferreiche Ausbildung der dortigen Zinnerzgänge darstellen, von Bedeutung.

Die Vereinigten Staaten von Nordamerika sind reich an Kupferlagerstätten von mancherlei Art. Die seit 1850 bekannte Lagerstätte von Ducktown ist eines der in den kristallinen Schiefern der Alleghanies verbreiteten Kieslager. Höchst eigenartig ist das Kupfererzvorkommen auf der Keweenaw-Halbinsel am Obern See im Staate Michigan. Gediegenes Kupfer bildet hier fast ganz ausschließlich das Erz bis in so große Tiefe, daß es im Gegensatz zu seinem sonstigen Vorkommen für primär gehalten werden muß. In der 180 km langen, bis 7 km breiten Kupferregion herrschen präkambrische Sandsteine und Konglomerate samt eingelagerten eruptiven Decken, insbesondere von Diabas. Das Kupfer tritt bald mit Kalkspat, Quarz, Prehnit ($H_2Ca_2Al_2Si_3O_{12}$), Zeolithen usw. in Gängen auf und breitet sich von diesen in dem Nebengestein aus, dieses scheinbar verdrängend, so daß auf solche Weise Massen von enormem Gewicht, angeblich bis zu 420000 kg entstanden; oder das Metall findet sich in den Konglomeraten, ihren Zement bildend oder ganze, manchmal fußgroße Gerölle verdrängend; endlich hat es sich in den Blasenräumen von Diabasmandelsteinen angesiedelt, indem es auch hier die ursprünglichen, aus Kalkspat bestehenden Mandeln oder das Gestein selbst verdrängte. Ueberall ist das Kupfer von Mineralien be-

Digitized by Google

gleitet, die sich als Umwandlungsprodukte der Gesteine erklären lassen. Mit dem Kupfer zusammen, indessen nie mit ihm legiert, kommt gelegentlich auch gediegenes Silber vor. Am Oberen See haben schon die Ureinwohner Kupferbergbau getrieben. Der neuere Bergbau datiert seit 1847; von den zahlreichen seither erstandenen Gruben sind jetzt diejenigen im Houghtondistrikt (besonders Calumet und Hecla) am wichtigsten. Gegenwärtig erzeugt Michigan nur mehr ungefähr ein Zwölftel der auf 500000 Tonnen veranschlagten Kupferproduktion der Vereinigten Staaten.

Zu Butte in Montana setzen zahlreiche, bis zu 30 m mächtige Kupfererzgänge in Granit auf. Ihr eiserner Hut war mitunter reich an Gold und Silber; unter ihm folgte eine reiche Konzentration sekundärer Sulfide (Kupferindig, Buntkupfererz, Kupferglanz) und dann, stellenweise erst 450 bis 660 m unter der Oberfläche, reichlicher Enargit. Hauptgangart ist der Quarz. Das zu Butte gewonnene Erz ist ziemlich reich an Gold und Silber; manche Gänge wurden in den oberen Teilen als Silbererzgänge abgebaut. Montana ist gegenwärtig mit einer Kupferproduktion von rund 150000 Tonnen das Hauptkupferland der Erde.

Hinter der Kupfererzeugung Montanas steht diejenige Arizonas nur wenig zurück, ja sie hat jene sogar zeitweise übertroffen. Der Reichtum dieses Staates beruht vorzugsweise in den veredelten Ausstrichen der Kontaktlagerstätten von Bisbee, Clifton-Morenci und Globe. Fast ein Drittel der nordamerikanischen Kupferproduktion stammt aus den Gruben Arizonas. Der Kupferbergbau in diesem Staate besteht seit etwa 35 Jahren.

In Mexiko sind seit den letzten Jahren die Kontaktlagerstätten von Cananea im Staate Sonora wichtig geworden; andere liegen bei Concepción del Oro im Staate Zacatecas. In Bolivien bestehen die reichsten Kupferlagerstätten, diejenigen von Corocoro südlich vom Titicacasee, in Imprägnationen von gediegenem Kupfer innerhalb eines Komplexes eisenschüssiger, wahrscheinlich kretazeischer Sandsteine. Im übrigen sind Kupferlagerstätten an der Westseite Südamerikas sehr verbreitet von Peru bis nach Chile, wo der Kupferdistrikt Tamaya, nordwestlich von Ovalle, lange Zeit einer der reichsten der Erde war.

In Deutschsüdwestafrika sind die wichtigsten in Abbau stehenden Kupfererzlagerstätten die metasomatischen, übrigens auch ziemlich bleireichen Vorkommnisse von Tsumeb (Otavi). Die bisher gewonnenen Erze entstammen dem sekundär veredelten Lagerstättenausstrich.

Die Lagerstätten von Burra-Burra und einige andere in Südaustralien verdankten ihren anfänglichen Reichtum gleichfalls den sekundären Erzen der oberen Teufen.

Die Kupferproduktion betrug 1910 in

Vereinigte Staaten	493000 t
Mexiko	60000 t
Spanien und Portugal	51000 t
Japan	47000 t
Australien	41000 t
Chile	26000 t
Deutschland	25000 t
Rußland	23000 t
Peru	19000 t

Blei und Zink. Viele der weiter vorn genannten Silber- und Goldsilbererzgänge sind zugleich Bleiglanzlagerstätten. Als eigentliche Bleierzlagerstätten mögen hier solche genannt werden, deren Haupterz der Bleiglanz ohne wesentliche Begleitung primärer edler Silbererze darstellt. Er selbst ist immer mehr oder weniger silberhaltig. Bleiglanz und Zinkblende sind so regelmäßig auf derselben Lagerstätte vereinigt, daß die meisten Bleierzlagerstätten zugleich solche von Zinkerzen sind und umgekehrt. Im Ausstriche der metasomatischen Lagerstätten hat die Verwitterung der Zinkblende zur Bildung von Galmei geführt, die selbst wiederum von einer Verdrängung von Kalkstein begleitet gewesen ist, mithin gewissermaßen metasomatische Lagerstätten zweiter Generation ergeben hat.

Mit ganz geringen Ausnahmen gehören die Bleizinkerzlagerstätten zu den Gängen und den metasomatischen Lagerstätten, ganz wenige sind Kontaktlagerstätten; nur für wenige blei- und zinkerzführende „Lager", wie z. B. für das früher besprochene Kieslager im Rammelsberg, läßt sich mit hoher Wahrscheinlichkeit eine Gleichaltrigkeit mit dem Nebengestein behaupten.

Im Freiberger Revier (vgl. oben unter Silber) sind die Gänge der „kiesigen" und der „barytischen Bleiformation" die eigentlichen Bleierzlagerstätten; erstere führen zudem viel schwarze Zinkblende, die auf letzteren ganz zurücktritt.

Die Gänge des westlichen Oberharzes (Fig. 5) setzen vorwiegend in Tonschiefern und Grauwacken des Kulm, untergeordnet auch im Devon oder auf Verwerfungen zwischen beiden auf. Es sind zusammengesetzte Gänge, Ausfüllungen bis zu 80 m mächtiger, an Verwerfer gebundener Spaltensysteme, teilweise über 10 km weit zu verfolgen; ihr Streichen ist annähernd parallel dem nördlichen Harzrande. Nach ihrer Mineralführung unterscheidet man zwei Gruppen: die südlichen Gänge (Grunder Revier) führen hauptsächlich Bleiglanz mit Schwerspat und Siderit, die nördlichen

Digitized by Google

(Clausthal-Zellerfeld, Lautenthal) enthalten Bleiglanz und Zinkblende, die letztere mehrfach in der Tiefe überhandnehmend, sowie auch etwas Kupferkies neben Quarz und Kalkspat als vorwiegenden Gangarten. Edle Silbererze fehlen fast vollständig. Im Grunder Revier steigt der Silbergehalt des Bleiglanzes bis auf 0,3%, sonst erreicht er kaum 0,1%. Der Oberharzer Bergbau reicht vielleicht bis ins 13. Jahrhundert zurück, wurde aber eigentlich erst im XVI. Jahrhundert durch den Zuzug erzgebirgischer Bergleute begründet.

Die durch ihre schönen Mineralien berühmt gewordenen Gruben von Neudorf im Unterharz sind jetzt aufgelassen.

Die Bleierzgänge von Holzappel, Ems und Braubach an der unteren Lahn und am Rhein setzen in unterdevonischen Schiefern und Grauwacken auf; bekannt sind die prächtigen Pyromorphite von der Grube Friedrichssegen bei Braubach. Die sonstigen Gänge des rheinisch-westfälischen Schiefergebirges, von denen die von Bensberg bei Köln die mächtigsten sind, führen hauptsächlich Zinkblende.

Die seit Jahrhunderten bekannten Bleiglanzlager bei Commern und Mechernich im rheinländischen Kreis Schleiden haben noch vor wenig Jahren reiche Ausbeute gegeben, gelten aber jetzt als erschöpft. Einige Sandsteinhorizonte des dortigen Hauptbuntsandsteins führen massenhafte rundliche Konkretionen von Sandkörnchen mit kristallisiertem Bleiglanz, die sogenannten Bleierzknotten. Diese letzteren werden selten über erbsengroß; sie machen 4 bis 10% des Gesteinsgewichtes aus. Wo sie auftreten, ist der sonst rote Sandstein gebleicht. Mitunter kommen neben dem Bleiglanz auch Knotten von Kupferkarbonaten vor.

Die wichtigsten Zinkerzlagerstätten Europas sind die metasomatischen Lagerstätten in der Gegend von Aachen und in Oberschlesien. In dem preußisch-belgischen Grenzgebiete westlich von Aachen finden sie sich dort, wo der Kohlenkalk, oder in selteneren Fällen da, wo der mitteldevonische Eifelkalk von Querverwerfungen durchsetzt wird. Bleiglanz und Zinkblende, an deren Stelle in den oberen Teufen der Galmei tritt, bilden längs der Grenze zwischen den Schiefertonen und den dolomitisierten Kalksteinen lagerartige oder stockförmige Massen; seltener sind die in das Schiefergebirge hineinsetzenden Gänge. Die Grube Schmalgraf ist jetzt die wichtigste dieses unter dem Namen Altenberg (Vieille Montagne) bekannten Revieres. Ganz ähnlich sind die Lagerstätten bei Stolberg (Diepenlinchen) östlich von Aachen, ähnlicher Entstehung auch die an Eifeler Kalk gebundenen Galmeilager von Iserlohn und Schwelm in Westfalen.

Die Erzlagerstätten von Tarnowitz und Beuthen in Oberschlesien gehören der Muschelkalkformation an, die dort in zwei Grabenversenkungen, eingesunken in die Schichten des Steinkohlengebirges, vor der Abrasion bewahrt worden ist. Zu Tarnowitz herrscht Bleiglanz, Beuthen produzierte früher viel Galmei; jetzt sind dort die tieferen Lagerstättenteile reich an Blende. Das erzführende Gestein ist hier wie dort fast ausschließlich ein etwa 50 m mächtiger dolomitisierter Kalkstein des unteren Muschelkalkes, dessen Unterlage ein sehr tonreicher und deshalb wasserundurchlässiger Kalkstein bildet. Im großen ganzen unterscheidet man im Dolomit zwei übereinanderliegende „Erzlager“; man darf wohl annehmen, daß auf den Spalten, längs denen das Niedersinken der Muschelkalkschollen vor sich ging, die Metalllösungen emporstiegen und sich vorzugsweise längs der Schichtflächen ausbreiteten, den Kalkstein verdrängend und dolomitisierend. Tarnowitz ist im Jahre 1526 gegründet; indessen hat wohl schon lange vorher dort Blei- und Silberbergbau stattgefunden. Der neuere Erzbergbau Oberschlesiens datiert seit der Erwerbung des Landes durch Preußen.

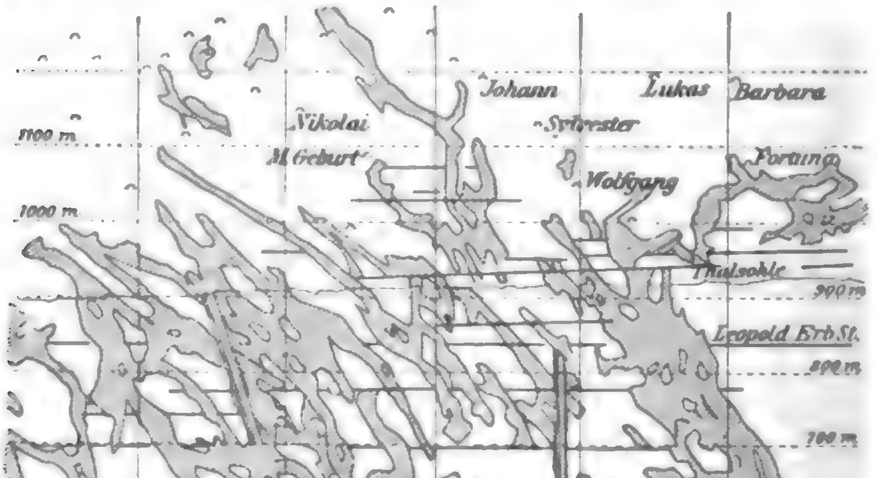


Fig. 11. Profil durch die metasomatischen Bleiglanzlagerstätten von Kreuth in Kärnten. Maßstab 1:12500. Nach Pošepny. Aus Stelzner-Bergeat, Erzlagerstätten.

Digitized by Google

Die im oberen Muschelkalk auftretenden Galmeilager von Wiesloch bei Heidelberg sind den oberschlesischen ähnlich; ihre Bildung scheint in Beziehung zum Grabenbruch des Rheintales zu stehen.

In den bayrischen und tiroler Nordalpen führt der Wettersteinkalk (obere Trias) stellenweise Bleierze, so zu Bieberwier am Fernpaß und im Höllental bei Garmisch, wo Gelbbleierz auftritt. Viel verbreiteter sind metasomatische Blei- und Zinkerzlagerstätten im südalpinen Wettersteinkalk; am bedeutendsten sind diejenigen von Raibl und Bleiberg-Kreuth (Fig. 11) in der Gegend von Villach in Kärnten. In den oberen Teufen der Bleiberger Gruben bildet Gelbbleierz eine merkwürdige Erscheinung.

Die an Mineralien, besonders auch an allerlei Silikaten reiche Bleizinkerzlagerstätte in den kristallinen Schiefern am Schneeberg bei Sterzing in Tirol scheint teilweise gangförmiger Natur zu sein; ein anderer Teil des Vorkommens ist wahrscheinlich unter Verdrängung einer Kalksteineinlagerung entstanden. Von sonstigen österreichischen Bleierzlagerstätten hat nur noch das Ganggebiet von Přibram in Böhmen Bedeutung (Fig. 12). Das Nebengestein der Gänge bilden im wesentlichen präkambrische Schiefer und kambrische Grauwacken. Ihr Auftreten ist, ohne daß von genetischen Beziehungen gesprochen werden könnte, räumlich gebunden an die zahlreichen, in dichter Menge jene Sedimente durchsetzenden Diabasgänge; ihre Erzführung dürfte zu einer benachbarten Granitintrusion in Beziehung stehen. Die Mineralführung der Gänge ist sehr mannigfaltig. Das gewöhnliche Erz besteht aus silberreichem Bleiglanz, Zinkblende, Kalkspat und Siderit; daneben spielen die quarzigen „Dürrerze" eine sehr wichtige Rolle, in welchen der Bleiglanz mehr zurücktritt und die edle Metallführung vorzugsweise an Silbererze gebunden ist. Die Přibramer Gruben bestehen wohl schon seit 600 Jahren und gehören mit Schachttiefen bis gegen 1200 m zu den tiefsten Erzgruben der Erde. Der ehedem berühmte Bergbau von Kuttenberg und der von Mies in Böhmen sind völlig aufgelassen.

Zu Monteponi im Distrikt Iglesias auf Sardinien haben die in silurischem Kalkstein aufsetzenden metasomatischen Bleiglanzlagerstätten die Form von Schläuchen („Erzsäulen"). Sie entstanden offenbar im Durchschnitte von Klüften mit den Schichtflächen; innerhalb eines 300 m langen und 100 m breiten Raumes kennt man ungefähr 60 solcher Erzsäulen. Monteponi ist bekannt wegen seiner schönen sekundären Bleierze, besonders als Fundort des schön kristallisierten Phosgenites. In derselben Gegend sind auch ergiebige Galmeilager.

Die Bleierzgänge von Linares und La Carolina-Sta. Elena südlich der Sierra Morena in Spanien gehören zu den ergiebigsten der Erde. Erwähnt seien ferner die metasomatischen, schon von den Karthagern und Römern ausgebeuteten Bleierzlagerstätten von

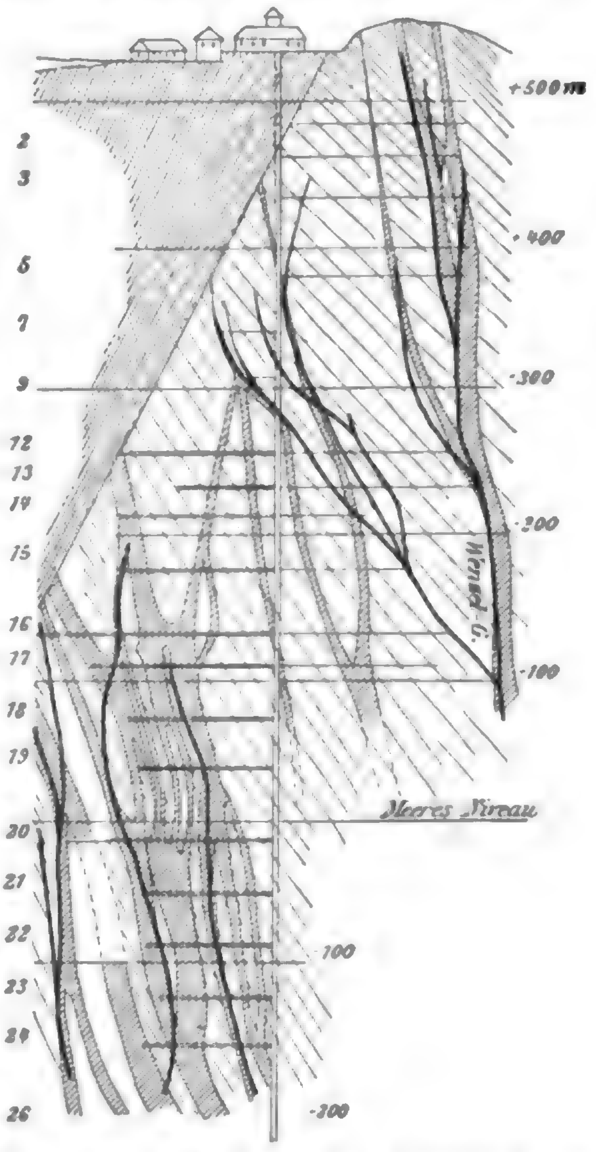


Fig. 12. Profil durch den Annaschacht zu Přibram. Diabasgänge (schraffiert) „schleppen" die Blei-Silbererzgänge (schwarz). Beide setzen an einer Ueberschiebungsfläche zwischen Grauwacke (rechts) und Tonschiefer (links oben) ab. Maßstab 1:6700. Nach Pošepny. Aus Stelzner-Bergeat, Erzlagerstätten.

Cartagena. In den Pyrenäen sind Galmeilager zwischen Guipúzcoa und den Picos de Europa bei Santander erschlossen; bekannt ist die schöne Zinkblende von der Grube Inagotable in letzterem Gebirgsstocke.

Die metasomatischen Bleiglanzlager im Kohlenkalk von Northumberland, Cumberland, Durham, Westmoreland und Derbyshire

Digitized by Google

sind jetzt bedeutungslos. Die schönen englischen Flußspate und Schwerspate stammen von solchen.

Schon im Altertum, besonders im 5. Jahrh. v. Chr., hatte ein lebhafter Blei- und Silberbergbau auf den Lagerstätten von Laurion am Kap Sunion in Attika statt. Bleiglanz, Zinkblende und jüngere Ausscheidungen von Galmei treten dort mit den mannigfachen Formen metasomatischer Lagerstätten in mehreren durch Schieferbänke voneinander getrennten Marmorlagen auf. Am wichtigsten sind die Gruben von Kamaresa. Als man im Jahre 1864 die Ausbeutung der längst verlassenen Gruben wieder aufnahm, gewann man zunächst noch nennenswerte Mengen von Silber und Blei aus den massenhaften Schlacken der athenischen Zeit. Gegenwärtig ist die Gegend von Laurion ein wichtiger Galmeiproduzent.

Ganz einzigartig ist das Vorkommen von Zinkblende als primärer Bestandteil einer im übrigen aus Feldspat, Quarz, Glimmer, Granat, Pyroxen, Hornblende usw. bestehenden schichtartigen, gebänderten Einlagerung in dem feinkörnigen Gneis von Åmmeberg in Schweden. Dieses Zinkblendelager ist gegen 4 km weit mit einer bis zu 15 m betragenden Mächtigkeit bekannt und folgt allen Biegungen des Gneisstreichens wie ein konkordant eingelagerter Gesteinskörper. Neben der Zinkblende führt das Lager auch etwas Bleiglanz und Pyrit.

Ein anderes Zinkerzvorkommen ganz besonderer Art ist dasjenige von Franklin Furnace und Sterling Hill im Staate New Jersey. Die Erze sind hier nicht sulfidisch sondern oxydisch, nämlich der Zinkmanganeisenspinell Franklinit, das Rotzinkerz, der Willemit (Zn_2SiO_4) und der Troostit ($[Zn,Mn,Fe,Mg]_2SiO_4$). Diese zusammen mit Manganpyroxen und Mangangranat bilden eine bis zu 15 m mächtige Einlagerung in einer trogförmig gefalteten Marmormasse, die ihrerseits von Gneis unterlagert wird. Die Erzmassen verdrängen den Marmor und verlieren sich andererseits in ihm. Man ist geneigt, das merkwürdige Vorkommen für eine Kontaktlagerstätte zu halten, wofür die Gegenwart von Pegmatit in unmittelbarer Nähe der Erze spricht.

Metasomatische Blei- und Zinkerzlagerstätten sind in großer Zahl über ein etwa 500 km langes und 300 km breites Gebiet in den Staaten Missouri, Kansas, Arkansas, im Indian Territory, in Illinois, Wisconsin und Jowa verbreitet. Man unterscheidet den Südostdistrikt südlich von St. Louis, den Zentraldistrikt um Jefferson, beide mit vorherrschenden Bleiglanzlagerstätten, und den Südwestdistrikt um Joplin, welcher gegenwärtig die Hauptmenge des amerikanischen Zinkes liefert und einer der wichtigsten Zinkerzdistrikte der Erde überhaupt ist. Hier sind die Lagerstätten an den unteren Kohlenkalk, in den beiden anderen Distrikten an verschiedene Kalksteinhorizonte des Untersilurs gebunden. In sehr mannigfaltiger Form bilden sie Imprägnationen, Höhlenfüllungen, Erzschläuche, stockartige Anreicherungen usw. Die Ausbeutung der Bleierzlager durch die Weißen reicht bis ins 18. Jahrhundert zurück. Missouri produziert jetzt fast genau so viel Zink wie Blei, nämlich je rund 128000 Tonnen.

Zu den metasomatischen Bleierzlagern gehören auch manche in früherer Zeit wegen des Gold- und Silbergehaltes ihrer Ausstriche berühmte Vorkommnisse in Colorado (Leadville, Aspen), Nevada (Eureka), Neu-Mexiko (Lake Valley) und viele andere. Jetzt ist neben Missouri der Staat Idaho der wichtigste Bleiproduzent Nordamerikas; dort haben die Bleierzgänge von Coeur d'Alène eine sehr große Bedeutung gewonnen.

Die an sekundären Erzen reichen Lagerstätten von Mapimi in Mexiko scheinen metasomatischer Natur zu sein. Das gewaltige Bleizinkerzlager von Brokenhill in Australien wurde schon weiter oben wegen seines silberreichen eisernen Hutes namhaft gemacht.

Es produzierten im Jahre 1910, teilweise aus importierten Erzen,

	Blei	Zink
Vereinigte Staaten	355000 t	251000 t
Spanien	180000 t	6600 t
Deutschland	156000 t	228000 t
Mexiko	121000 t	—
Belgien	89000 t	173000 t
Australien	80000 t	—
England	32000 t	64000 t
Holland	—	21000 t
Frankreich	26000 t	51500 t
Oesterreich	13000 t	13000 t

Zinn. Das Auftreten des Zinnerzes auf primärer Lagerstätte ist fast ausschließlich an Granit und dessen Kontakthöfe gebunden; in allen seltenen Ausnahmen zeigen sich wenigstens Beziehungen zu anderen sauren Gesteinen: so bei gewissen Zinnerzvorkommnissen in Rhyolithen Mexikos, bei den zinnerzführenden Silbererzgängen Boliviens und bei den sehr spärlich vertretenen Vorkommnissen des Erzes auf metasomatischen oder auf Kontaktlagerstätten. Wegen seiner Härte, seiner chemischen Widerstandsfähigkeit und seines hohen spez. Gewichtes kann das Zinnerz eine Anreicherung auf alluvialen und eluvialen Seifen erfahren, die mitunter vielleicht durch eine sekundäre Konzentration im eisernen Hute seiner primären Lagerstätten vorbereitet worden ist.

Die an Granit gebundenen Zinnerzgänge bieten ein ausgezeichnetes Beispiel einer-

Digitized by Google

seits für unmittelbare Beziehungen zwischen Erzgängen und Tiefengesteinen, andererseits für paragenetische Gesetzmäßigkeiten. In ersterer Hinsicht stehen sie nach ihrem Auftreten und ihrer mineralogischen Zusammensetzung den als kristallisierte granitische Restlaugen zu betrachtenden Pegmatiten sehr nahe. Sie werden vielfach, aber ohne zureichende Begründung, als pneumatolytische Bildungen, ja geradezu als Sublimationsprodukte bei der Entgasung der Granite betrachtet; besser werden sie vielleicht als Kristallisationen aus sehr heißen und sehr reaktionsfähigen Lösungen bezeichnet. So weit das Nebengestein aus Granit, Gneis oder anderen feldspatführenden Gesteinen besteht, ist der Feldspat darin in Kali- (und wohl auch Lithion-)Glimmer und Quarz umgewandelt und es entstand so das als „Greisen" bezeichnete sehr charakteristische Gestein. Sehr häufig ist auch eine Turmalinisierung, seltener eine Topasierung des Nebengesteins; oft ist auch der Feldspat in solchem Grade durch Zinnerz ersetzt, daß das Gestein selbst zum Erz wird („Zwitter"). Die Paragenesis der gewöhnlichen, an Granit gebundenen Zinnerzgänge unterscheidet sich wesentlich von derjenigen der meisten anderen Erzgänge. Ausgezeichnete und naheliegende Beispiele für dieselbe bieten die Zinnerzlagerstätten des Erzgebirges. Gewöhnliche Begleiter des Zinnerzes sind der Quarz, der Orthoklas, ferner Wolframit und Scheelit, Eisenglanz, gediegen Wismut, Kupferkies und Arsenkies; Lithionglimmer, Topas, Turmalin, der Fluorapatit, der Flußspat und selten auch die Berylliumsilikate Beryll ($Be_3Al_2Si_6O_{18}$) und Phenakit (Be_2SiO_4). Eine ähnliche, besonders durch Bor, Fluor, Lithium und Phosphorsäure gekennzeichnete Paragenesis wiederholt sich sonst noch bei einzelnen Kupfer- und Golderzgängen. Gerade ihr Gehalt an Bor und Fluor war von jeher der Anlaß, diesen Gängen eine pneumatolytische Entstehung zuzuschreiben; nach Daubrée hätte sich das Zinnerz durch folgende Reaktion gebildet: $SnF_4 + 2H_2O = SnO_2 + 4HF$. Ihre Möglichkeit läßt sich experimentell beweisen.

Für die Gewinnung des Zinnes haben die primären Zinnerzlagerstätten heute nur mehr eine nebensächliche Bedeutung, der größte Teil des Erzes stammt aus eluvialen und alluvialen Seifen.

Von den zahlreichen sächsischen Zinnerzlagerstätten stehen nur noch wenige in Abbau. Zu Altenberg ist die Peripherie eines postkarbonischen Granitdurchbruches stockwerkartig mit Zinnerz und dessen Begleitern dermaßen durchwachsen und imprägniert, daß das Gestein selbst verpocht werden muß, um den nur 0,3% betragenden Zinngehalt zu gewinnen; nebendem wird noch der 0,002% betragende Wismutgehalt nutzbar gemacht. Zu Zinnwald finden sich die zinnerzführenden Mineralansiedelungen außer auf Gängen auch auf den Absonderungsklüften, durch welche die dortige Granitkuppe in zahlreiche flach-schalenförmig übereinanderliegende Bänke zerfällt. Solcher „Zwitterflöze" kennt man bis zu 100 m Tiefe im ganzen 16. Der Zinngehalt beträgt durchschnittlich 0,5 bis 0,7%; übrigens wird jetzt hauptsächlich Lithionglimmer und Wolframit gewonnen. Als weitere, zeitweise blühende Zinnerzgruben sind zu nennen diejenigen von Geyer (Fig. 13) und Ehrenfriedersdorf, wo auch Arsenkies gewonnen wurde, und zu Graupen bei Teplitz und Schlaggenwald bei Karlsbad. Der erzgebirgische Zinnerzbergbau reicht bis ins 15., derjenige von Schlaggenwald mindestens bis ins 12. oder 13. Jahrhundert zurück. Auch Zinnseifen sind früher im Erzgebirge an vielen Orten ausgebeutet worden.

Ohne bei den zahlreichen mehr oder weniger unwichtigen Zinnerzgängen in der Bretagne, in Zentralfrankreich und im Westen der iberischen Halbinsel (Provinz Galicia) zu verweilen, sei etwas ausführlicher der altberühmten Zinnerzlagerstätten der Halbinsel Cornwall gedacht. In dem etwa 130 km langen und 35 km breiten Minendistrikt durchbrechen große und kleine Granitstöcke eine hauptsächlich aus paläozoischen Grauwacken und Tonschiefern bestehende Gebirgsformation; sie sind begleitet und umschwärmt von zahlreichen petrographisch verwandten Gesteinsgängen. Im Zusammenhang mit den Intrusionen steht die Bildung von Zinn-Kupfererzgängen, auf welche diejenige von Bleierzgängen folgte. Nur die ersteren haben größere Wichtigkeit. Sie setzen teils nur im Granit auf; sehr häufig treten sie aus diesem in die Kontaktzone über, und führen bald nur Zinnerz, bald nur Kupfererze, bald beide Erze zusammen. Auf vielen Gängen gewann man im Ausstrich nur Zinnerz, während sich in größerer Tiefe sekundäre Kupfererze fanden, letztere oft ausgezeichnet durch ihre schöne Kristallisation (z. B. Kupferglanz, Rotkupfererz). Im Granit tritt das Erz teils in eigentlichen Gängen und neben diesen in mehr oder weniger reichen Imprägnationen auf, deren eine, die große Carbona von St. Ives in einem ungefähr 220 m langen und etwa 10 m hohen und breiten Weitungsbau 60000 t mit Zinnerz durchwachsenen Granit ergeben hat, teils auch war das Vorkommen ein stockwerkartiges. Es ist bekannt, daß schon die Phönizier aus England Zinn geholt haben sollen. Die in uralten Zeiten ausgebeuteten Zinnerzseifen sind jetzt sozusagen völlig erschöpft. Eine hohe Bedeutung hatte der Zinn- und Kupferbergbau Cornwalls in

Digitized by Google

früheren Jahrhunderten; im Jahre 1871 erreichte er seine höchste Blüte und ist seitdem mehr und mehr unbedeutend geworden.

erzführende, aus der Verwitterung zinnerzführender Granite hervorgegangene Boden auf das Erz verwaschen. Nachdem der Zinnreichtum der beiden genannten Inseln gegen

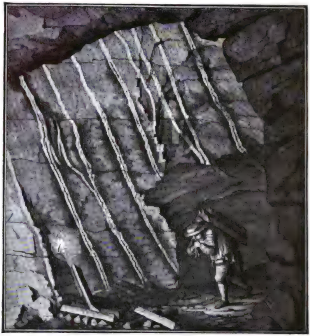


Fig. 13. Ein „Zug" von Zinnerzgängen in Granit. Neben den Gängen ist der Granit mit Erz imprägniert. Zinnerzlagerstätten zu Geyer im Erzgebirge. Nach Charpentier.

früher sehr bedeutend abgenommen hat, stammt jetzt weitaus das meiste Zinn des Handels aus Malakka.

Nordamerika ist trotz der großen Verbreitung von Granit sehr arm an Zinnerzlagerstätten, die dort noch dazu von nur geringem Umfang sind. Das merkwürdige Vorkommen des Zinnerzes auf den Silbererzgängen Boliviens ist schon früher erwähnt worden. In ungewöhnlicher Weise findet sich das Erz in Rhyolithen Mexikos.

Die Zinnproduktion der Hauptzinnländer betrug 1910:

Malayische Staaten (Straits)	57000 t
Bangka-Billiton	14500 t
Bolivien	19000 t
Australien	5000 t
England	6000 t

Erwähnung verdient das Zinnerzvorkommen von Campiglia Maritima in Toskana, das lediglich mit Brauneisenstein, welcher teilweise deutliche Pseudomorphosen nach Pyrit bildet, auf metasomatischen Lagerstätten in einem normalen Kalkstein auftritt.

Reich an Zinnerzlagerstätten ist Australien; die wichtigsten sind diejenigen am Mount Bischoff in Tasmanien. In Queensland sind die Gänge teilweise ziemlich reich an Wolframit und Molybdänglanz

Das reichste Zinnerzgebiet der Erde erstreckt sich von Bangka und Billiton, zwei südlich Singapore gelegenen Inseln, nordwärts durch die Halbinsel Malakka. Insbesondere in den Malayenstaaten Perak und Selangor wird seit sehr langer Zeit der über hunderte von Kilometern verbreitete zinn-

Wolfram. Wolframit ist ein treuer Begleiter des Zinnerzes und besitzt z. B. zu Zinnwald jetzt neben Lithionglimmer eine größere Bedeutung als das letztere. Gänge, welche neben Quarz im wesentlichen Wolframit führen, aber doch mehr oder weniger enge mineralogische Beziehungen zu den Zinnerzgängen erkennen lassen, sind z. B. in Portugal, Sachsen, Brasilien, Australien und in der argentinischen Republik bekannt. Die ganze Wolframitproduktion der Erde betrug 1909 ca. 5000 t.

Eisen. Als Eisenerze kommen die früher bezeichneten Oxyde und Hydroxyde, nebensächlich auch die bei der Schwefelsäurefabrikation abgerösteten Kiese in Betracht. Die Zahl der Eisenerzlagerstätten auf der Erde ist eine ungeheuere; ihre Verwertbarkeit hat eine außerordentliche Vermehrung und ihre Bewertung eine völlige Umwälzung seit der Erfindung des Entphosphorungsprozesses durch Thomas und Gilchrist (1879) erfahren, durch den heute phosphorhaltige Eisenerze im weitesten Umfang unter gleichzeitiger Gewinnung der phosphorhaltigen Schlacke verarbeitet werden können. Trotzdem bleiben weitaus die meisten Eisenerzlagerstätten heute noch unbenutzt, weil ihre Ausnutzung auch bei dem höchsten Eisengehalt (bei Magnetit 72% Fe) unmöglich wird, wenn der Transport des Erzes zur Verhüttung nur einigermaßen kostspielig ist.

Die Eisenerze zeigen unter allen Erzen die größte Mannigfaltigkeit des Auftretens. Die wichtigsten Lagerstätten des Eisens können nach ihrer geologischen Erscheinungsweise als Lager bezeichnet werden; so die Magnetit- und Eisenglanzlagerstätten in den kristallinen Schiefern vieler Gegenden, die Roteisenerzlagerstätten des deutschen Devons, die sedimentären Minettelager im braunen Jura und zahlreiche andere Eisenoolithvorkommnisse vom Silur bis zum Tertiär. Echte sedimentäre Bildungen sind ferner die Rasen-, Sumpf- und See-Erze, die Toneisen- und Kohleneisensteine. Lagerförmig treten gewisse metasomatische Spateisensteine in verschiedenen Kalksteinformationen auf. Als magmatische Ausscheidungen finden sich Massen von titanhaltigem Magnetit und Titaneisen in Anorthositen Südnorwegens und der Adirondackberge im Staate New York sowie im Hyperit des Tabergs in Småland. Sie haben nur geringe wirtschaftliche Bedeutung. Ebenso haben die Roteisenerz- und Spateisensteingänge vielfach sehr von ihrer früheren Bedeutung verloren. Zu den Kontaktlagerstätten gehören viele von „Skarn“ (vgl. 6e) begleitete, an Kalke oder Dolomite gebundene Magnetit- und Eisenglanzlager. Ueber die metathetischen Konzentrationen von Brauneisenerz vergleiche 6f.

Das größte europäische Eisenerzfeld sind die Minetteablagerungen in Luxemburg und in den deutsch-französischen Grenzgebieten bis in die Gegend von Nancy. Dieser oolithische Eisenstein bildet mehrere mächtige Lager im obersten Lias und unteren Dogger. Wegen ihres ziemlich ansehnlichen Phosphorgehaltes war die Minette früher nicht abbauwürdig, ihre Ausbeutung begann erst in den 1870er Jahren und hat seitdem und in der letzten Zeit auch in Französisch-Lothringen einen ungeheuren Aufschwung genommen.

Oolithische Eisenerze des Lias werden gegenwärtig noch zu Harzburg am Nordrande des Harzes, solche des Doggers zu Wasseralfingen in Württemberg, solche des unteren Malm an der Porta Westfalica abgebaut. Am nördlichen Harzrande finden sich ähnliche Eisenerzablagerungen in der unteren Kreide (Hils) bei Salzgitter und Dörnten. Die bedeutende Eisenhütte von Großilsede bei Hannover verarbeitet hauptsächlich Brauneisensteine, welche bei Peine ein stellenweise über 10 m mächtiges Lager zwischen dem Quadratenmergel und Gault bilden. Das Erz kommt in gerundeten oder fast scharfkantigen Geröllen jeder Größe bis herab zu derjenigen von Brauneisenerzsand vor und hat sich jedenfalls infolge der Aufschwemmung älterer toneisensteinführender Schichten durch das seichte Kreidemeer gebildet. Oolithische Eisenerze finden sich in eocänen Schichten der Nordalpen und wurden früher besonders am Kressenberg südlich vom Chiemsee abgebaut.

Erwähnung verdienen die silurischen Eisensteine von Schmiedefeld in Thüringen; sie bestehen großenteils aus den eisenreichen chloritähnlichen Mineralien Chamosit und Thuringit; hauptsächlich das letztere Mineral tritt darin in der Form ausgezeichneter Oolithe auf. Etwa gleichalterig und von ganz ähnlicher Art sind die Eisensteine, welche südwestlich von Prag eine weite Verbreitung besitzen und in der Gegend von Nutschitz auf eine Erstreckung von 8 km und mit einer größten Mächtigkeit von 14 m ein bauwürdiges Lager von zweifellos sedimentärem Ursprung bilden.

Die Kohleneisensteine der verschiedenen deutschen und außerdeutschen Steinkohlenreviere lohnen jetzt kaum mehr die Gewinnung. Dasselbe gilt im ganzen auch von den besonders in den Jura- und Kreideablagerungen sehr verbreiteten Toneisensteinen. Die in ganz Norddeutschland im Bereich der eiszeitlichen Ablagerungen auftretenden Raseneisensteine (vgl. 6b) werden gegenwärtig nur noch in geringer Menge verhüttet.

Die wichtigsten Eisensteingänge sind die Siegerländer Spateisensteinlagerstätten. Sie bilden gruppenweise in unterdevonischen

Digitized by Google

Grauwacken und Schiefern sogenannte Gangzüge, deren man bei Siegen 16 zählt und welche Längen bis zu 15 km erreichen. Dabei besitzen einzelne Gänge ganz ungewöhnliche Mächtigkeiten bis zu 30 m. Neben zahlreichen untergeordneten Mineralien, z. B. von Kobalt und Nickel, führen die Siegerländer Eisensteingänge stets Quarz und besonders in den oberen Teufen auch Kupfererze, Bleiglanz und Zinkblende. Der Wert des Siegerländer Eisensteines besteht in seiner Phosphorfreiheit und seinem oft recht beträchtlichen Mangangehalt. Bis in teilweise ansehnliche Tiefen ist der Spateisenstein in Roteisenerz und Brauneisenstein umgewandelt, in deren Gesellschaft sekundäre Mangan- und auch Kupfermineralien angetroffen werden.

Die Roteisensteingänge im Erzgebirge und am Harz (Andreasberg, Zorge, Lauterberg) sind jetzt bedeutungslos geworden.

In Begleitung der Kalksteine, Diabase und Diabastuffe (Schalsteine) des rechtsrheinischen Mittel- und Oberdevons kommen vielfach, insbesondere im Lahntal, in Waldeck und im Harz (z. B. bei Elbingerode und Osterode-Clausthal) Lager von Roteisenstein vor. Sie sind manchmal erfüllt von Versteinerungen mit wohlerhaltener Kalkschale, woraus zu schließen ist, daß sie nicht metasomatischer Entstehung sein können. Anderer Art sind die auf den Stringocephalenkalk aufgelagerten, metasomatischen Brauneisensteine z. B. bei Gießen, die wegen des Vorkommens kristallisierter Eisenphosphate mineralogisches Interesse besitzen (z. B. bei Waldgirmes) und nach ihrer Entstehung mit den später zu erwähnenden Manganerzlagern derselben Gegend verwandt sind.

Als metasomatische, an Jurakalk gebundene Massen werden neuerdings die Eisenerzlager von Amberg in der Oberpfalz aufgefaßt. Metasomatische, mehr oder weniger in Brauneisenstein umgewandelte Spateisensteinlager werden im Zechstein von Schmalkalden, bei Saalfeld, am Hüggel bei Osnabrück und bei Bieber am Spessart abgebaut.

Kontaktlagerstätten sind wohl die in mehr oder weniger deutlichem Zusammenhang mit Graniten stehenden Magnetitlager von Schmiedeberg im Riesengebirge und solche im Erzgebirge bei Schwarzenberg, wo sie von Arseneisen, Zinkblende, Bleiglanz und anderen Erzen begleitet werden.

Als der Typus der Kontaktlagerstätten gelten seit Jahrzehnten die mehr oder weniger sulfidführenden Magnetitlager bei Vaskö (Moravicza), Dognácska, Oravicza, Csiklova u. a. a. O. im Banat; sie sind unmittelbar an den Durchbruch dioritischer Intrusionen durch einen zu Marmor veränderten Kalkstein gebunden und bekannt als der Fundort schön kristallisierter Kontaktmineralien wie Granat, Wollastonit und Vesuvian.

Eine der großartigsten Eisensteinlagerstätten Europas und neben dem Nutschitzer Eisenerzvorkommen (vgl. oben) das wichtigste Eisensteinlager Oesterreichs ist der Erzberg bei Eisenerz in Steiermark. Er besteht an seinem Nordwestabhange bis zur Mächtigkeit von 125 m aus Spateisenstein, der seit Jahrhunderten abgebaut wird. Solcher Lager, die jetzt für metasomatische Bildungen in paläozoischen Kalksteinen gehalten werden, gibt es noch zahlreiche kleinere in den österreichischen Nordalpen vom Salzburgischen bis zum Semmering. Weiter südlich sind die Erzlager von Hüttenberg in Kärnten gleichfalls metasomatische Spateisensteinlager in kristallinem Kalkstein.

Im Zipser Komitat, z. B. zu Bindt und Kotterbach südöstlich der Tatra, werden mehrfach mächtige Spateisensteingänge abgebaut. Sie führen auch mehr oder weniger Kupferkies und stellenweise auch quecksilberhaltiges Fahlerz. Große Spateisenstein- bzw. Brauneisenerzlager werden bei Gyalár im Hunyader Komitat ausgebeutet.

Zu den Kontaktlagerstätten zählen wiederum die wegen ihrer schönkristallisierten Mineralien berühmten Eisenstein-Pyrit-Lager von Traversella und Brosso in Piemont und wenigstens teilweise auch die wichtigsten italienischen Eisenerzlagerstätten, nämlich diejenigen von Elba (Fig. 14). Die an der Ostküste letzterer Insel bei Rio Marina auftretenden Vorkommnisse sind zweierlei Art: die nördlich gelegenen führen in verschiedenen Horizonten (Perm, Rhät und Lias), scheinbar immer in engem Zusammenhang

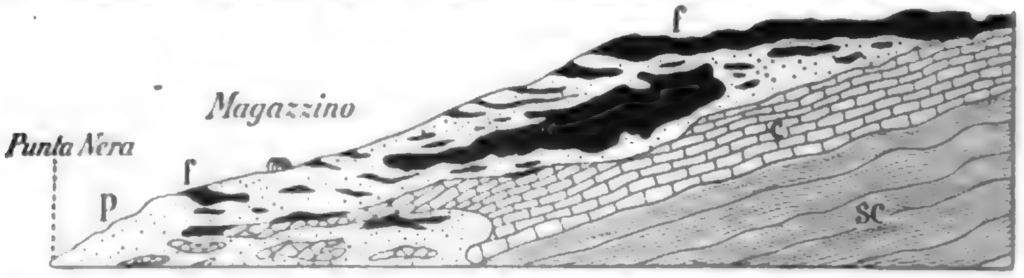


Fig. 14. Schematisches Profil durch die Eisensteinlagerstätten von Calamita auf Elba. sc Schiefer; c Kalkstein; p Pyroxen-Ilvait-Granatfels. f Magneteisenstein. Nach Fabri und Lotti. Aus Stelzner-Bergeat, Erzlagerstätten.

Digitized by Google

mit eingelagerten Kalksteinen Roteisenstein, Eisenglanz und Schwefelkies mit etwas Quarz, aber ohne Kontaktsilikate. Die berühmten Elbaner Eisenglanz- und Pyritkristalle stammen von dort. Südlich von Rio, insbesondere auf dem Berge Calamita ist das Erz Magneteisenstein, gleichfalls gebunden an Kalkstein, jedoch begleitet von Silikaten. Die Lagerstätten sind zwar nirgends unmittelbar an eruptive Durchbrüche geknüpft, doch treten Granitgänge in ihrer nächsten Nähe auf.

Die englische Eisenindustrie früherer Zeiten gründete sich vorzugsweise auf die in den zahlreichen Steinkohlenrevieren vorkommenden Kohleneisensteine. Bedeutung besitzen jetzt noch die metasomatischen Roteisensteinlagerstätten im Kohlenkalk, seltener auch im Silurkalk von Cumberland und Lancashire, insbesondere im Whitehaven-Distrikt, von wo die unter dem Fundort Frizington bekannten prächtigen Kalkspäte stammen. In neuerer Zeit sind die oolithischen Eisensteine wichtig geworden, die sich an zahlreichen Orten und in verschiedenen Horizonten der jurassischen Ablagerungen vorfinden, welche von Cleveland im Nordosten bis Portland im Süden England durchziehen; insbesondere gilt dies von den sogenannten „Cleveland-Erzen" des mittleren Lias.

Schon im Altertum wurden die jetzt für die deutsche und besonders die englische Eisenindustrie so wertvollen Eisenerzlager von Bilbao am Golf von Biscaya ausgenutzt. Das Erz bildet metasomatische Massen in Kalkstein der unteren Kreide und besteht im frischen Zustande aus Spateisenstein, der in großem Umfange in der gewöhnlichen Art umgewandelt ist.

Schweden ist eines der eisenreichsten Länder der Erde; die Eisenerzlager gehören sozusagen alle zwei großen Distrikten an, dem mittelschwedischen westlich von Stockholm und dem lappländischen; die beiden Erzzonen sind rund 650 km voneinander entfernt, weisen aber in petrographischer Hinsicht manche Aehnlichkeiten auf. Die Lagerstätten Mittelschwedens sind sämtlich der kristallinen Schieferformation und im besonderen gewissen feinkörnigen gneisartigen Gesteinen eingelagert, welche man in Schweden als Granulite oder Leptite zu bezeichnen pflegt. Bald sind die Erze sehr quarzreich, feldspatarm und bestehen vorzugsweise aus Eisenglanz; oder es sind Magneteisensteine mit Skarn, d. h. mit einem Gemenge von Hornblende, Pyroxen, Granat usw., eingelagert in Gesteine, die durch einen besonders hohen Gehalt an Natronfeldspat ausgezeichnet und dabei oft nach Art der Kontaktlagerstätten an Kalkstein oder Dolomit gebunden sind; ein ganz eigenartiger Erztypus sind endlich die mehr oder weniger apatitreichen Magnetit- und Eisenglanzlager von Grängesberg, zugleich die wichtigsten Mittelschwedens; sie sind eingelagert in einen gleichfalls sehr natronreichen Plagioklas-„Granulit" und bilden drei Züge von Lagern, deren bedeutendstes 400 m lang und 90 m mächtig ist. Das Grängesberger Erz wird besonders nach den rheinischen und oberschlesischen Hütten exportiert. Zum Typus der skarnführenden Magneteisensteine gehören die altberühmten Lager von Dannemora. Die wichtigsten Eisensteingruben Lapplands sind diejenigen von Gellivare und etwa 100 km nördlich davon diejenigen auf den Bergen Kirunavara und Luossavara bei Kiruna. Zu Gellivare liegen zahlreiche Linsen von teilweise apatitreichem Magneteisenstein in einem sehr stark gepreßten und schieferartig ausgewalzten Natronsyenit. In den beiden Erzbergen von Kiruna tritt ein etwa 4 km langer Zug syenitischer und quarzhaltiger Orthoklasgesteine zutage, an welche ein fast ebenso weit verfolgbares, steileinfallendes und bis zu 164 m, im Durchschnitt über 70 m mächtiges Lager von apatitführendem Magnetit in solcher Weise gebunden ist, daß auch an dessen magmatischem Ursprung nicht gezweifelt werden kann. Die lappländischen Eisenerzlager gehören zu den kolossalsten Lagerstätten der Erde; ihre enorme Produktion wird über Luleå im Osten und Narvik im Westen hauptsächlich nach Deutschland, England und Nordamerika ausgeführt.

Im Vergleich zu Schweden ist Norwegen arm an Lagerstätten des Eisens. Die Kontaktlagerstätten von Arendal, südwestlich von Christiania, berühmt wegen ihres Reichtums an schönen Mineralien, und diejenigen der Gegend von Christiania haben für die Eisenproduktion keine Bedeutung mehr. Die schon wiederholt erwähnten Titaneisensteine von Ekersund-Soggendal sind niemals in größerem Maßstabe verhüttet worden, weil sie zu eisenarm sind. Erwähnung verdienen die an eine sedimentäre Schiefer- und Kalksteinformation gebundenen, recht bedeutenden Eisenglanzlager von Naeverhaugen und Dunderlandsdal, dieses südlich, jenes westlich vom Sulitjelma.

Die berühmten Magneteisenberge Wissokaja und Gora Blagodat im mittleren Ural dürften den Kontaktlagerstätten zuzurechnen sein. Eine solche ist wohl auch das große Magnetitlager von Mokta-el-Hadid in Algier.

Die bedeutendsten Eisenerzlagerstätten Nordamerikas sind diejenigen im Bereich der präkambrischen Formationen am Oberen See und zwar insbesondere an dessen südlichem Ufer in den Distrikten Marquette, Menominee, Crystal Falls und Penokee Gogebic im Staate Wisconsin, an seinem

Digitized by Google

westlichen Ufer im Mesabi- und Vermilion-Distrikt im Staate Minnesota. In ihrer jetzigen Erscheinungsweise sind die Erze sekundärer Natur und hervorgegangen aus der oberflächlichen Zersetzung von sedimentären Sideritkieselschiefern und magnetitführenden Aktinolithschiefern; die ersteren sind dabei zu prachtvoll gebänderten Jaspisschiefern geworden, ein großer Teil des Eisengehaltes jener Gesteine ist aber ausgelaugt worden und nach der Tiefe gewandert, um sich in oxydischen Erzen längs undurchlässiger Einlagerungen, wie z. B. am Kontakt talkig zersetzter Diorite oder Diabase, welche die eisenführenden Schichten durchsetzen, oder am Grunde tektonischer Mulden wieder auszuscheiden. Zumeist besteht das Erz aus Hämatit oder lockerem Roteisenstein, teilweise auch aus Magnetit, zunächst der Oberfläche aus Eisenhydroxyden. Zufolge ihrer Entstehungsart sind nur wenige bis in Tiefen unter 300 m zu verfolgen, die Erschöpfung der Eisenerze am Oberen See steht deshalb in absehbarer Zeit bevor. Im Marquettedistrikt findet etwa seit 1850 Eisensteinbergbau statt; erst in den Jahren 1891 bis 1892 wurden auch die Mesabi- und Vermilionlagerstätten erschlossen. Allein seit 1891 hat sich die Jahresproduktion verdoppelt; sie erreichte im Jahre 1907 ein Maximum mit 42 Mill. metr. Tonnen gegenüber einer Gesamteisenerzförderung der Vereinigten Staaten von rund 53 Mill. im Werte von annähernd 500 Mill. M.

Im Osten der Union sind Eisenerze mannigfacher Art verbreitet: so titanhaltige Magnetite als Ausscheidungen der Anorthosite in den Adirondack-Bergen (New York), Magnetit- und Eisenglanzlager in den kristallinen Schiefern von New York bis nach Alabama, Brauneisenerze als eiserner Hut von Pyritlagern, als metasomatische Auflagerungen und metathetische und residuale Anreicherungen, ferner die sedimentären, teilweise oolithischen Clinton-Erze im Silur, die insbesondere zu Birmingham in Alabama verhüttet werden. Zu den Kontaktlagerstätten gehören diejenigen von Cornwall in Pennsylvanien und zu Iron Springs im südwestlichen Utah.

Eine Uebersicht über die Eisenerzeugung der Länder würde, da die Eisenerze zur Verhüttung in die Steinkohlendistrikte zu wandern pflegen, nur die Entwickelung der Eisenindustrie, nicht aber den Eisenreichtum der Länder zur Anschauung bringen. Die gegenwärtige Roheisenproduktion der Welt wird auf 60 Mill. Tonnen geschätzt. Der gewinnbare Eisenvorrat der Lagerstätten wird u. a. geschätzt in den Vereinigten Staaten auf etwa 4,6 Milliarden, in Deutschland auf rund 4 Milliarden Tonnen.

Mangan. Die wesentlichste Bedeutung der Manganerze liegt heute nicht mehr im Sauerstoffgehalt der als Braunstein bezeichneten Manganverbindungen, sondern in ihrer Verwendung bei der Verarbeitung des Roheisens. Viele Eisensteine, wie die Spateisensteine des Siegerlandes oder Steiermarks, oder gewisse schwedische Magnetite enthalten selbst schon erhebliche Mengen Mangan.

Die Braunsteingänge in den Porphyren, Porphyriten und Melaphyren des Rotliegenden in Thüringen und am Südharz sind jetzt größtenteils verlassen. Zu Oehrenstock bei Ilmenau und zu Elgersburg südlich von Gotha waren Pyrolusit, Psilomelan und daneben Hausmannit und Braunit die Erze, zu Ilfeld am Harz fanden sich prächtige Kristallisationen von Manganit.

Zu Paisberg, Långban und an einigen anderen Orten Mittelschwedens finden sich Braunit und Hausmannit gebunden an Dolomitlager und begleitet von mehr oder weniger selbständigen Einlagerungen von Eisenglanz und von allerlei Silikaten wie Granat, Rhodonit und anderen Manganpyroxenen, manganhaltigem Glimmer usw. ganz in der Art der von Skarn begleiteten Magneteisensteine derselben Gegend. Eine merkwürdige Erscheinung bildet das in Klüften des Erzes auftretende gediegene Blei.

Marine Sedimente sind die ausgedehnten Manganerzlager von Kutais in Transkaukasien. Sie liegen innerhalb eines 2 bis 3 m mächtigen Schichtenkomplexes alttertiärer Sandsteine und bestehen hauptsächlich aus dichtem Psilomelan in knolliger oder ausgesprochen oolithischer Struktur.

Durch die Auslaugung und Konzentration von Mangan bei der Verwitterung manganhaltiger Gesteine und deren Detritus, also durch eine Metathese, ist die Entstehung sehr zahlreicher Manganerzlager zu erklären; gewöhnlich finden sich auf diesen auch nicht unbeträchtliche Mengen von Eisenoxyd. Vielfach ist das Muttergestein solcher Vorkommnisse Kieselschiefer, mitunter mit einem sichtbaren Gehalt von Rhodonit, wie z. B. im Schäbenholz im Unterharz. Die reichen Braunsteinlager der Lindener Mark bei Gießen sind Auflagerungen auf mitteldevonischem Stringocephalenkalk; ihr Ursprung leitet sich jedenfalls von der tonigen Zersetzung des Gesteinsschlammes ab, der in der Tertiärzeit auf der Oberfläche des Kalksteins abgelagert worden ist.

Chrom. Das einzige Chromerz, der Chromit, kommt nur als magmatische Ausscheidung in Peridotiten und in den zu diesen in Beziehung stehenden Serpentinen vor und bildet darin derbe Massen von mitunter gewaltigen Dimensionen. Geringfügige Chromitvorkommnisse sind diejenigen im Zobtengebirge (Schlesien) und zu Kraubat

Digitized by Google

in Steiermark, weit verbreitet sind solche in Norwegen, andere liegen bei Orsowa, in Bosnien, Serbien und im Ural. Große Chromitlagerstätten werden im westlichen Kleinasien bei Brussa, ferner bei Antiochia, Mersina, Alexandrette und Smyrna, auf Euböa, in Neuseeland und auf Neukaledonien abgebaut, das im Jahre 1908 als wichtigster Chromitproduzent 47000 t des Erzes ausführte.

Aluminium. Der Kryolith tritt in größerer Menge nur zu Ivigtut an der Westküste Grönlands auf. Er bildet dort hauptsächlich mit Siderit, Quarz, Bleiglanz, Zinkblende, Kupfer- und Schwefelkies eine stockförmige Masse, die in ähnlicher genetischer Beziehung zu einem Granitdurchbruch steht, wie das von Pegmatiten bekannt ist. Nur etwa ein Fünftel der grönländischen Kryolithproduktion wird übrigens zur Aluminiumfabrikation verwendet, etwa zwei Fünftel dienen zur Herstellung von Milchglas, andere zwei Fünftel zur Emaillefabrikation. Das Haupterz für die Aluminiumdarstellung ist jetzt der Bauxit, welcher bei Baux, Villeveyrac und anderen Orten Südfrankreichs, vor allem auch in den nordamerikanischen Staaten Georgia, Alabama und Arkansas gewonnen wird. Die Vereinigten Staaten produzierten im Jahre 1910 150000 t des Erzes, Frankreich 130000 t.

Nickel. Die heutige umfangreiche Verwendung des Nickels wird im wesentlichen der Entdeckung der Lagerstätten des nickelführenden Magnetkieses bei Sudbury in Kanada (1884) und des Garnierits auf der französischen Insel Neukaledonien (1864) verdankt. Zu Sudbury (Provinz Ontario) ist der nickelführende Magnetkies, stets begleitet von Kupferkies, im allgemeinen gebunden an amphibolitische Einlagerungen in den kristallinen Schiefern des Hurons; sie erweisen sich als regionalmetamorphe Gabbros und verwandte Gesteine. Das Erz tritt besonders gern an der Peripherie dieser Einlagerungen auf. Die Verbreitung des Nickelmagnetkieses erstreckt sich über eine etwa 80 km lange und 40 km breite Zone. Sein Nickelgehalt beträgt 1 bis 5%, mitunter auch über 10%; die Kupferführung der Lagerstätten ist ungefähr ebenso hoch. Die Nickelproduktion Kanadas belief sich im Jahre 1910 auf rund 17000 t. Aehnliche, an basische, zumeist gabbroartige Gesteine oder Amphibolite gebundene Lagerstätten sind besonders vor der Zeit des kanadischen und neukaledonischen Nickelbergbaues an zahlreichen Stellen Norwegens und zu Varallo im Piemont abgebaut worden; verwandt damit ist auch das Vorkommen von Sohland in der sächsischen Lausitz.

Die durch eine intensive Zersetzung von nickelhaltigem Serpentin entstandenen Lagerstätten von grünen Nickelhydrosilikaten, wie sie an vielen Stellen Neukaledoniens seit 1874 abgebaut werden, sind eines der wenigen Beispiele für die allmähliche Anreicherung größerer Erzmassen durch Lateralsekretion (vgl. unter 7). Neukaledonien lieferte 1910 über 115000 t Garnieriterze mit etwa 6½% Nickel.

Von anderen Vorkommnissen derselben Art seien die Lagerstätten von Frankenstein in Schlesien erwähnt, die seit 1891 ausgebeutet werden. Die grünen Nickelsilikate, Schuchardtit und Pimelit, finden sich dort im sogenannten roten Gebirge, einem längs zahlreicher Spalten zu eisenschüssig tonigen Massen umgewandelten Serpentin, der dadurch stellenweise bis zu 3% Nickel enthalten kann. Chrysopras und Chloropal sind sekundäre, durch Nickelsilikat grün gefärbte Kieselausscheidungen.

Kobalt. Wenn Speiskobalt oder seltener der Kobaltglanz in größeren Mengen auf Erzgängen auftritt, wie in der Gegend von Schneeberg in Sachsen und am Temiskaming-See in Ontario, wo sie von Silbererzen begleitet werden, auf den Spateisensteingängen bei Siegen, auf den sogenannten „Kobaltrücken" Thüringens oder des Spessarts, so bildeten sie in früherer Zeit und sind sie gelegentlich noch jetzt (wie zu Schneeberg) wichtige Erze für die Smaltefabrikation. Von nicht gangförmigen Kobaltlagerstätten sind zunächst zu erwähnen die vor einigen Jahren verlassenen Kobaltfahlbänder von Skuterud und Snarum in Südnorwegen, nahe Modum. Sie bilden sehr quarzreiche, mehr oder weniger Glimmer, Turmalin, Pyroxen und Amphibol führende Einlagerungen in der Gneis-Glimmerschieferformation; das Hauptkobalterz ist Kobaltglanz, der u. a. von Pyrit, Magnetkies, Kupferkies und Molybdänglanz begleitet wird. In Schweden bestand Kobaltbergbau auf den Fahlbändern von Vena am Nordende des Wetternsees und zu Tunaberg, wo die schönen Kobaltglanzkristalle in kristallinem Kalkstein auftreten.

In neuerer Zeit haben die als „Trüffelerz" bezeichneten metathetischen Asbolane von Neukaledonien, die einen Kobaltgehalt von 2 bis 3% besitzen, technische Bedeutung erlangt (vgl. 6f).

Antimon. Die Paragenesis Antimonit, selten mit gediegenem Antimon, und Quarz ist charakteristisch für die Antimonerzgänge. Solche finden sich, mitunter mit allerlei Sulfantimoniden des Bleies und Kupfers bei Wolfsberg am Harz, zu Brück a. d. Ahr, zu Arnsberg in Westfalen, wo sie auf Schichtklüften auftreten, zu Milleschau in Böhmen, wo sie wie zu Schleiz auch etwas goldführend sind, zu Schlaining in Oberungarn, an zahlreichen Stellen des französischen

Digitized by Google

Zentralplateaus, auf Korsika, Sardinien und in Toskana usw. Bekannt sind die prächtigen bis zwei Fuß langen Antimonitkristalle aus den Gängen von Ichinokawa auf der japanischen Insel Shikoku.

Wismut. Der geringe Bedarf an Wismut wird hauptsächlich aus Gängen von der Paragenesis der Zinnerzgänge gewonnen. Die größten Wismutlagerstätten sind die Gänge auf den Bergen Tasna und Chorolque in Bolivien; das Wismuterz ist hier nicht wie gewöhnlich gediegen Wismut, sondern der sonst seltene Wismutglanz; mit etwa 97 000 kg war Bolivien im Jahre 1910 der Hauptwismutproduzent.

Schwefel. In größeren Mengen findet sich der Schwefel als Fumarolenprodukt an Vulkanen, wo er, wie in Japan oder am Popocatepetl in Mexiko, noch jetzt gewonnen wird. Sedimentäre Schwefellager, die mit vulkanischer Tätigkeit nichts zu tun haben, sind verbreitet in jüngeren tertiären Schichten, wie in den Congerienschichten der Romagna zu Perticara, in der Gegend von Siena, im Miocän von Swoszowice in Galizien und im schlesischen Kreise Pleß, zu Radoboj in Kroatien, sowie vor allem auf Sizilien. Die hauptsächlichste Verbreitung des Schwefels auf Sizilien liegt zwischen den Städten Trapani, Paternò und Licata; der primäre Schwefel bildet in feiner Verteilung den Bestandteil eines grauen Mergels, während die schönen von Gips, Coelestin, Aragonit usw. begleiteten Kristalle sekundäre Kristallisationen in Klüften sind. Ueberall finden sich mit den tertiären Schwefelmergeln auch Ablagerungen von Gips, Steinsalz, in Sizilien stellenweise auch von Glaubersalz, allgemein enthalten sie auch größere oder geringere Mengen von Kohlenwasserstoffen, wie Petroleum; daß es sich um Sedimente aus brackischem Wasser handelt, geht aus der Versteinerungsführung hervor. Ueber die Entstehung der sedimentären Schwefellager vgl. 6b.

Seit 1868 kennt man in der Kreideformation Louisianas über 30 m mächtige auf Gips und Steinsalz ruhende Schwefellager. Italien mit 435 000 und die Vereinigten Staaten mit 303 000 t hatten im Jahre 1909 weitaus die größte Schwefelproduktion. Für die Darstellung der Schwefelsäure ist außer den mannigfachen sonstigen Sulfiden ganz besonders der Schwefelkies, der bei völliger Abröstung 53,3 % Schwefel abgibt, von höchster Bedeutung. Auf manchen Lagerstätten findet er sich fast ohne irgendwelche anderen Erze, wie z. B. auf dem mitteldevonischen Kieslager von Meggen a. d. Lenne. Kieslager sind außerordentlich weit verbreitet z. B. in den Alpen (Panzendorf in Kärnten, Agordo in Venezien, Oeblarn, Kallwang usw. in Steiermark, zu Pinerolo im Piemont), abgesehen von den schon früher erwähnten wegen ihres Kupfergehaltes wichtigen Vorkommnissen. Besonders die arsenfreien Kiese sind gesucht für die Darstellung der Kochlaugen in der Papierfabrikation.

Phosphatlagerstätten. Apatit findet sich an zahlreichen Orten des südlichen Norwegens (z. B. bei Kragerö und Bamle) zusammen mit viel Rutil (TiO_2), Titaneisen, Hornblende, Magnesiaglimmer, Enstatit, Skapolith, Feldspäten und anderen teilweise gut kristallisierten Mineralien gangförmig in Gabbros. Die im Jahre 1872 entdeckten reichen Lagerstätten haben in den achtziger Jahren bis zu 15 000 t Apatit jährlich gegeben, jetzt ist ihre Bedeutung sehr zurückgegangen. Aehnlicher Art sind die Lagerstätten zwischen Kingston und Ottawa in Ontario, von denen die bekannten in Kalkspat eingewachsenen Apatitkristalle stammen. Jetzt wird dort der in großen Platten auftretende Glimmer (Phlogopit) gewonnen.

Metasomatische, meistens an die Oberfläche von Stringocephalenkalk gebundene Phosphoritlager wurden seit 1864 an verschiedenen Orten des unteren Lahntales lebhaft abgebaut.

Durch metasomatische Prozesse erklärt sich auch die Entstehung der Phosphatlagerstätten auf der Oberfläche der Kreideschichten in ausgedehnten Gebieten Nordfrankreichs und Belgiens.

Die reichsten Phosphoritlagerstätten sind diejenigen von Florida; es sind teils metasomatische Anreicherungen in und auf tertiären Kalken, teils sind es zusammengeschwemmte Gerölle, die ihre ursprüngliche Heimat wahrscheinlich im Pliocän besitzen und jetzt in großen Mengen als „river pebbles" aus den Flüssen gebaggert werden. In Carolina finden sich die Phosphorite auf ihrer ersten Lagerstätte in sehr jugendlichen Ablagerungen, die erfüllt sind von Säugetierresten, während sie selbst Versteinerungen des Eocäns enthalten; es wird daraus geschlossen, daß es sich um ältere Kalk- oder Mergelknollen handle, die erst auf sekundärer Lagerstätte unter dem Einfluß verwesender tierischer Reste ihre Umwandlung in Phosphorit erfuhren.

Die auf gewissen Inseln Westindiens (z. B. Sombrero) und der Südsee (z. B. Jaluit) gewonnenen Phosphorite sind umgewandelte Korallenkalke (vgl. 6d). Außerordentlich weit verbreitet, aber meistens nicht hinreichend reich, sind schichtige Ablagerungen von Phosphoritkonkretionen, z. B. im Silur des Vogtlandes und Podoliens, im Devon der Pyrenäen, im Lias und ganz besonders in der Kreide der verschiedensten Gegenden. Die bedeutenden Lagerstätten von Algier und Tunis gehören den an Resten von Krebsen, Fischen und Sauriern reichen untereocänen Schichten an.

Die Produktion der hauptsächlichsten Phosphatländer stellte sich 1908 folgendermaßen:

Frankreich	486 000 t
Algier	452 000 t
Tunis	1 300 000 t
Belgien	198 000 t
Vereinigte Staaten	2 500 000 t
Ozeanien-Nauru-Inseln	300 000 t

Literatur. **Stelzner-Bergeat**, *Die Erzlagerstätten. Leipzig 1904 bis 1906.* — **R. Beck**, *Lehre von den Erzlagerstätten III. Aufl. Berlin 1909.* — **Beyschlag-Krusch-Vogt**, *Die Lagerstätten der nutzbaren Mineralien und Gesteine. Stuttgart. Erscheint seit 1909.* — **A. G. Werner**, *Neue Theorie von der Entstehung der Gänge. Freiberg 1791.* — **B. Cotta**, *Lehre von den Erzlagerstätten. Leipzig 1859 bis 1861.* — **A. von Groddeck**, *Die Lehre von den Lagerstätten der Erze. Leipzig 1879.* — **von Dechen-Bruhns**, *Die nutzbaren Mineralien und Ge*

Digitized by Google

birgsarten im Deutschen Reiche. Berlin 1906. — Das wichtigste statistische Montanhandbuch ist The Mineral Industry, New York. Die wichtigste deutsche einschlägige Zeitschrift ist die Zeitschrift für praktische Geologie. Berlin. Seit 1893.

A. Bergeat.

Erzwungene Schwingungen

siehe den Artikel „Schwingungen, erzwungene Schwingungen".

Escher von der Linth
Arnold.

Er war der Sohn des berühmten schweizerischen Staatsmannes Hans Konrad Escher, des Erbauers des Linth-Kanals, der wegen seiner Verdienste den Ehrennamen von der Linth erhielt. Am 8. Juni 1807 in Zürich geboren, erhielt er seine Vorbildung in der Vaterstadt. Seit 1825 studierte er in Genf, Berlin und Halle Naturwissenschaft, besonders Geologie. Während seiner Studienzeit bereiste er Deutschland, Oesterreich und Oberitalien. Von 1830 bis 1833 durchstreifte er mit den Geologen F. Hoffmann und Philippi Italien und Sizilien. 1834 habilitierte er sich an der Hochschule in Zürich, wurde dort 1852 Professor der Geologie an der Universität und 1856 auch am Polytechnikum. Er starb in Zürich am 12. Juli 1872.

Die Bedeutung Eschers von der Linth liegt in seinen Alpenforschungen. Besonders die Ostschweiz und die anstoßenden Gebiete sind von ihm in Gemeinschaft mit Studer und Heer eingehend untersucht worden. Zahlreiche Reisen ins Ausland, nach Deutschland, Frankreich, Italien, England, nach Algier und der Sahara ließen ihn wichtige Beobachtungen sammeln, wenngleich seine Hypothese von der Meeresbedeckung der Sahara zur Diluvialzeit, die die Ausbreitung der Gletscher ermöglicht haben sollte, nicht aufrecht erhalten werden konnte. Er besaß eine feine Beobachtungsgabe; doch veröffentlichte er sehr ungern seine Ergebnisse. Obwohl er nur eine unbedeutende Rednergabe besaß, übte er doch durch sein begeistertes Wort auf Schüler und Fachgenossen einen wirksamen Einfluß aus. Nach seinem Tode fielen seine wertvollen Sammlungen und Manuskripte dem Züricher Polytechnikum zu.

Wichtig ist seine 1849 erschienene Karte des Kanton Glarus und die gemeinschaftlich mit B. Studer herausgegebene Carte géologique de la Suisse (1853, 2. Aufl. 1869, 3. Aufl. 1894), die in der Fachwelt reiche Anerkennung fand.

Literatur. ***Heer,*** *Arnold Escher von der Linth. Lebensbild eines Naturforschers. Zürich 1873.* — ***Gümbel***, *Arnold Escher von der Linth. Allgemeine Deutsche Biographie, 6, S. 362 bis 365.*

O. Marschall.

Eschricht
Daniel Friedrich.

Geboren am 18. März 1798 in Kopenhagen, gestorben am 22. Februar 1863 dortselbst. Praktizierte 1822 bis 1825 auf Bornholm als Arzt und studierte dann Physiologie und vergleichende Anatomie an der Universität Kopenhagen, wo er 1829 Lektor, 1836 Professor wurde. Die meisten seiner Spezialabhandlungen sind in den Akten des Videnskabernes Selskab veröffentlicht worden, so die Bearbeitung der Anatomie der Salpen (1841) und der Wale (1843 bis 1862, 8 Abhandlungen). Er schrieb ferner: Handboog i Physiologi (Kopenhagen 1823 bis 1832, 2 Bd., 2. Aufl. 1851), Untersuchungen über die nordischen Waltiere, Leipzig 1849, Das physische Leben. Populäre Vorträge (Kopenhagen 1852, 2. Aufl. 1856), Unverstand und schlechte Erziehung, Vorlesungen über Kaspa Hauser, Berlin 1857, Folkelige Foredrag (1855 bis 1859).

Literatur. ***Carus,*** *Geschichte der Zoologie. München 1872.*

W. Harms.

Eschscholtz
Johann Friedrich von.

Geboren am 1./12. November 1793 in Dorpat, gestorben am 9./19. Mai 1834. Studierte Medizin und machte dann als Schiffsarzt 1815 mit Otto v. Kotzebue eine Reise um die Welt mit, an der auch Adelbert v. Chamisso teilnahm. 1828 machte er noch eine weitere Reise mit Kotzebue auf der „Predprijatie". Auf diesen beiden Reisen sammelte er das Material zu seiner bedeutungsvollen Arbeit „Ueber das System der Akalephen oder medusenartigen Strahltiere" (Berlin 1829). Seine reichen naturhistorischen Sammlungen vermachte er der Universität Dorpat. Besonders hervorzuheben ist noch sein Zoologischer Atlas, enthaltend Abbildungen und Beschreibungen neuer Tierarten (Berlin 1829 bis 1831). Für den dritten Band von Kotzebues Entdeckungsreisen in der Südsee und der Beringsstraße (Weimar 1821) lieferte er noch folgende Arbeiten: „Ueber die Koralleninseln, ihre Entstehung, Ausbildung und Eigentümlichkeiten", „Beschreibung einer neuen Affengattung Prebytis mitrata", „Naturhistorische und physiologische Bemerkungen über die Seeblasen", „Beschreibung neuer ausländischer Schmetterlinge": Papilio Kotzebue, P. Chamissonia, P. Krusensternia usw., „Ideen zur Aneinanderreihung der rückgrätigen Tiere" (Dorpat 1819), Entomographien (Berlin 1824), Zoologischer Atlas (enthaltend Abbildungen und Beschreibungen neuer Tierarten) (Berlin 1829 bis 1833, 5 Hefte).

Literatur. ***Carus,*** *Geschichte der Zoologie. München 1872.* — ***Burckhardt,*** *Geschichte der Zoologie. Leipzig 1907.*

W. Harms.

Digitized by Google

Ester.

I. Allgemeiner Teil. 1. Begriff. 2. Formulierung und Bezeichnung. 3. Vergleich mit den Salzen. Konstitution. 4. Verschiedene Arten von Estern: a) Saure und neutrale Ester. b) Ester mehrwertiger Alkohole. 5. Allgemeine Bildungsweisen. 6. Eigenschaften. Reaktionen. 7. Beeinflussung anderer Gruppen. 8. Anwendung der Ester. 9. Anwendung der Esterifizierung: a) Zum Schutz von OH und COOH-Gruppen. b) Zur Reinigung und Charakterisierung von Phenolen. c) Zur Erkennung der Anzahl von Hydroxylgruppen. 10. Esterbildung und Verseifung: a) Das Gleichgewicht. b) Die Reaktionsgeschwindigkeit: α) Anorganische Katalysatoren. β) Organische Katalysatoren. II. Spezieller Teil: A. Ester anorganischer Säuren. 11. Ester der Halogenwasserstoffsäuren. Halogenalkyle. 12. Ester der unterchlorigen Säure. 13. Ester der Ueberchlorsäure. 14. Ester des Schwefelwasserstoffs. 15. Ester der Sulfoxylsäure. 16. Ester der schwefligen Säure. a) Ester der unsymmetrischen Säure. b) Ester der symmetrischen Säure. 17. Ester der Schwefelsäure. a) Saure Ester. b) Neutrale Ester. 18. Ester der selenigen und Selensäure. 19. Ester der untersalpetrigen Säure. 20. Ester der salpetrigen Säure. 21. Ester der Salpetersäure. 22. Ester der phosphorigen und Phosphorsäure. 23. Ester der arsenigen, Arsen-, Bor- und Kieselsäure. B. Ester organischer Säuren. 24. Allgemeines. 25. Ester einbasischer Säuren mit niederen Alkoholen. 26. Fruchtäther. 27. Ester höherer Alkohole. 28. Ester mehrwertiger Alkohole. 29. Ester substituierter Fettsäuren. Acetessigester: a) Darstellung. b) Eigenschaften. Desmotropie. c) Spaltung. d) Alkylierung. e) Anwendung zu Synthesen. f) Kondensationsreaktionen. 30. Ester der Blausäure. 31. Ester mehrbasischer Säuren. 32. Ester von Orthosäuren. 33. Ester aromatischer Säuren. 34. Ester aromatischer Alkohole und Phenole. III. Anhang. Wachs. 1. Allgemeines. 2. Anwendungen. 3. Verfälschungen und Surrogate. 4. Tierische Wachse. 5. Pflanzenwachse.

I. Allgemeiner Teil.

1. Begriff. Mit dem Namen Aether bezeichnete man früher zweierlei Arten von Verbindungen, nämlich solche, die aus 2 Molekülen eines Alkohols unter Wasseraustritt entstehen und die heute noch als Aether bezeichnet werden (vgl. den Artikel „**Aether**")

$C_2H_5O\,H\;OH\,C_2H_5$		$C_2H_5—O—C_2H_5$
Aethyl-Alkohol		Aethyl-Aether

und dann solche, die aus einem Säure- und einem Alkohol-Molekül unter Wasseraustritt entstehen.

$CH_3COO\;H\;OH\;C_2H_5$		$CH_3CO\text{-}O\text{-}C_2H_5$
Essigsäure	Alkohol	früher Essigäther jetzt Essigester

Letztere repräsentieren also eine ganz andere Art von chemischen Verbindungen. Für diese zweite Art von Aethern führte Gmelin den Namen „Ester" ein. Ester sind also alle Verbindungen, die man sich aus 1 Molekül Säure und 1 Molekül Alkohol unter Wasseraustritt entstanden denken kann. Die früheren Bezeichnungen, z. B. Essigäther, Salpeteräther, sollten zweckmäßig fallen gelassen werden.

2. Formulierung und Bezeichnung. Man kann die Ester auffassen als Säuren, deren Wasserstoffatom durch einen Alkylrest ersetzt ist, z. B. den Methylester der Salzsäure als Salzsäure, deren Wasserstoff durch Methyl, das Radikal des Methylalkohols, ersetzt ist.

$Cl—H$	$—CH_3$	$Cl—CH_3$
Salzsäure	Methyl (Rad. des Methylalkohols)	Salzsäure-Methylester
$CH_3COO—H$	$—C_2H_5$	$CH_3COO—C_2H_5$
Essigsäure	Aethyl	Essigsäureäthylester

Dieser Auffassung entsprechen Bezeichnungen wie: Salzsäure-Methylester, Essigsäure-Methylester, Schwefelsäure-Diäthylester.

Andererseits kann man die Ester auffassen als Alkohole, deren Hydroxylgruppe durch einen Säurerest ersetzt ist, ähnlich wie man die Salze als Basen auffassen kann, deren Hydroxyl durch Säure ersetzt ist.

$C_2H_5—OH$	$—OCOCH_3$
Aethylalkohol	Rest der Essigsäure

$C_2H_5—O—COCH_3$
Aethylacetat

$C_2H_5—OH$	$—ONO_2$	$C_2H_5ONO_2$
	Rest der Salpetersäure	Aethylnitrat

Dieser Auffassung entspricht folgende, der Bezeichnungsweise der Salze nachgebildete Art der Benennung: Methylchlorid, Aethylacetat, Diäthylsulfat.

Endlich kann man sich die Ester sauerstoffhaltiger Säuren entstanden denken aus Alkoholen durch Ersatz des Wasserstoffatoms durch das Radikal einer Säure.

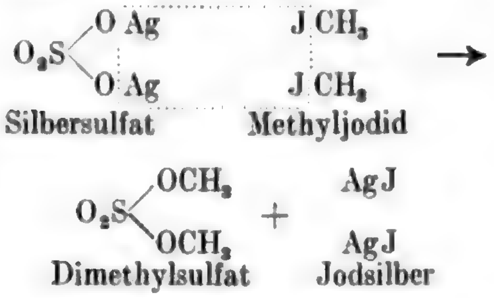
$C_2H_5O—H$	$—NO_2$	$C_2H_5O—NO_2$
Alkohol	Rad. d. Salpeters.	Aethylnitrat

3. Vergleich mit Salzen. Konstitution. Man kann die Ester unmittelbar mit den Salzen in Parallele stellen. Wie sich eine Base mit einer Säure unter Wasseraustritt zu einem Salz vereinigen kann, so kann sich ein Ester aus Säure und Alkohol unter Wasseraustritt bilden.

$Na\;OH$	$H\;Cl$	$Na—Cl$
Natriumhydroxyd	Salzsäure	Chlornatrium (Natriumchlorid)
$CH_3\;OH$	$H\;Cl$	$CH_3—Cl$
Methylalkohol	Salzsäure	Chlormethyl (Methylchlorid)

Digitized by Google

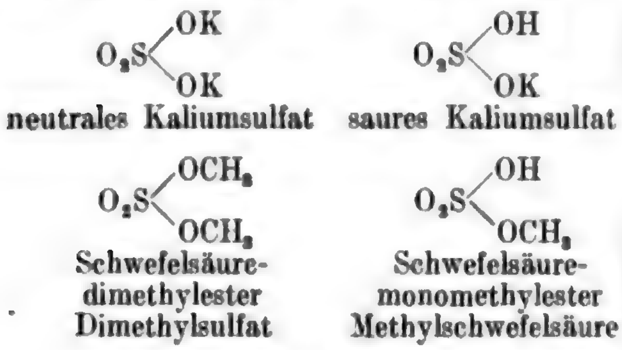
In der Tat ist auch in den Estern das Alkylradikal genau an derselben Stelle wie das Metall in den Salzen gebunden. Diese Auffassung stützt sich hauptsächlich auf die Darstellung von Estern aus Metallsalz und Alkylhalogeniden, wobei direkt das Alkyl den Platz des Metalles einnimmt.



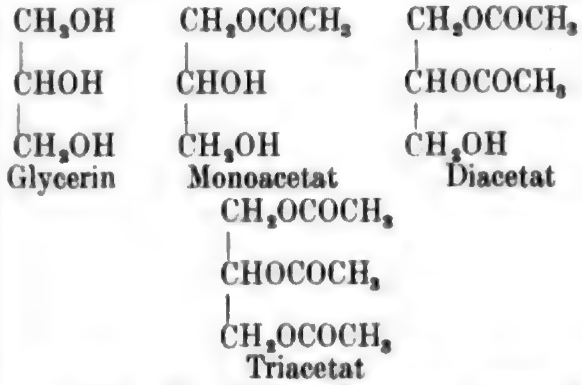
Wenn somit die Ester formal mit den Salzen zu vergleichen sind, so sind sie doch in ihrem physikalischen und chemischen Verhalten sehr von ihnen verschieden. Salze sind meist fest, Ester meist flüssig und leicht destillierbar. Vor allem sind die Ester nicht elektrolytisch dissoziiert, wie es gelöste Salze sind; Ester reagieren daher langsam (vgl. Abschnitt 6).

4. **Verschiedene Arten von Estern.** Da sich alle organischen und fast alle anorganischen Säuren mit Alkoholen zu Estern vereinigen lassen und da sowohl die Zahl der Säuren wie die der Alkohole unbegrenzt groß ist, ist auch die Zahl der Ester unendlich groß.

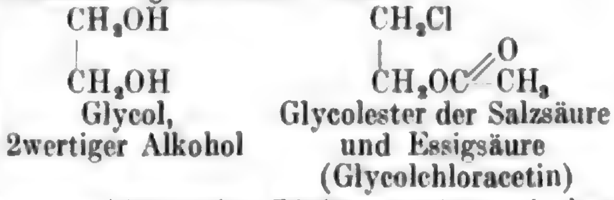
4a) Saure und neutrale Ester. In mehrbasischen Säuren können alle Wasserstoffatome durch Alkoholradikale ersetzt werden. Dann entstehen neutrale Ester. Sind nicht alle Wasserstoffatome ersetzt, so entstehen saure Ester, die noch den Charakter von Säuren haben und daher Estersäuren genannt werden. Sie können mit den sauren Salzen verglichen werden.



4b) Ester mehrwertiger Alkohole. Andererseits vermögen, ähnlich wie die mehrwertigen Basen, auch die mehrwertigen Alkohole verschiedene Arten von Estern zu bilden, je nachdem alle oder nur ein oder einige Wasserstoffatome durch Säurereste ersetzt sind.



Sind die Hydroxylgruppen mit den Resten verschiedener Säuren verestert, so entstehen gemischte Ester:



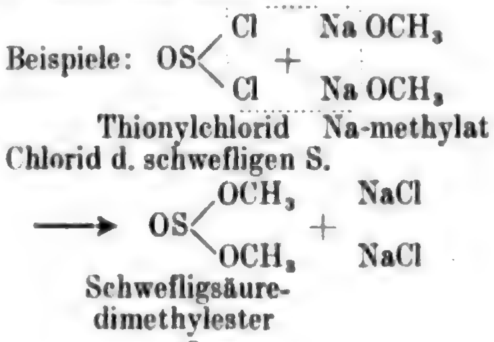
5. **Allgemeine Bildungsweisen.** 1. Aus der freien Säure und dem Alkohol bildet sich der Ester; doch ist die Reaktion nicht vollständig, sie bleibt bei einem Gleichgewicht stehen, da umgekehrt das gebildete Wasser den Ester spaltet.

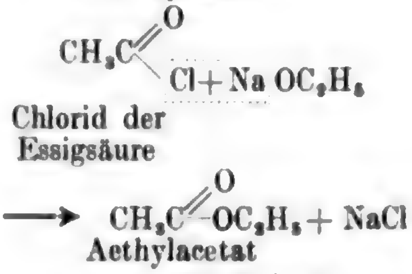
$$C_2H_5OH + HOCOCH_3 = C_2H_5OCOCH_3 + H_2O$$

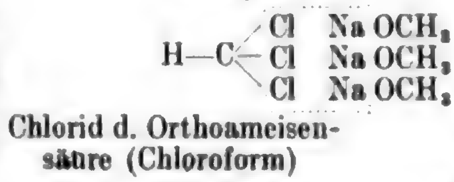
Alkohol Essigsäure Essigester Wasser

Um die Bildung des Esters möglichst vollständig zu machen, muß man daher entweder das Wasser binden, z. B. durch Schwefelsäure (organische Ester) oder muß die Ester, falls sie flüchtig sind, abdestillieren, z. B. Aethylnitrat, Nitrite (vgl. Abschnitt 10).

2. Aus Säurechloriden und Alkoholen oder besser Natriumalkoholat.







$$\longrightarrow HC\begin{cases}OCH_3\\OCH_3\\OCH_3\end{cases} + 3NaCl$$

Orthoameisensäure-methylester

3. Endlich lassen sich die Ester darstellen aus den Alkali- und besonders den Silbersalzen der Säuren mit Jodalkyl.

$$O_2S\begin{cases}OAg\\OAg\end{cases} \quad \begin{matrix}JC_2H_5\\JC_2H_5\end{matrix}$$

Silbersulfat Jodäthyl

$$\longrightarrow O_2S\begin{cases}OC_2H_5\\OC_2H_5\end{cases} + \begin{matrix}AgJ\\AgJ\end{matrix}$$

Diäthylsulfat

6. **Eigenschaften. Reaktionen.** Die sauren Ester verhalten sich in ihrer Fähigkeit zur Salzbildung wie Säuren. Die neutralen Ester niederer Alkohole mit anorganischen Säuren sind meistens unzersetzt destillierbare Flüssigkeiten; einige, z. B. Chlormethyl, Methylnitrit sind bei gewöhnlicher Temperatur gasförmig. Die Ester höherer Fettsäuren und die Ester hochschmelzender Alkohole sind flüssig oder fest und meistens hochsiedend.

Die neutralen Ester sind in Wasser meist unlöslich, in organischen Lösungsmitteln löslich.

Im Gegensatz zu den Salzen reagieren die Ester langsam: sie sind nicht elektrolytisch dissoziiert; auch bilden sie sich langsam aus Säure und Alkohol (siehe Abschnitt 10).

Es gibt allerdings Ester, die sich momentan aus den Komponenten bilden und sich momentan durch Wasser spalten lassen, z. B. die Nitrite. Ferner sind die anorganischen Ester eines komplizierten Alkohols, des Triphenylcarbinols, in Schwefeldioxydlösung elektrolytisch dissoziiert und zeigen Ionenreaktionen: sie bilden darin einen Uebergang zu den Salzen.

Verseifung. Die charakteristische Eigenschaft aller Ester ist, daß sie sich unter Wasseraufnahme in Säure und Alkohol zu spalten vermögen, ähnlich wie Salze schwacher Basen durch Wasser in Base und Säure gespalten werden (siehe den Artikel „Hydrolyse").

$$Al\begin{cases}Cl\\Cl\\Cl\end{cases} \begin{matrix}H\,OH\\H\,OH\\H\,OH\end{matrix} \rightarrow Al\begin{cases}OH\\OH\\OH\end{cases} + HCl$$

Aluminiumchlorid und Wasser — Aluminiumhydroxyd und Salzsäure

$$C_2H_5{-}Cl \quad HOH \rightarrow C_2H_5OH + HCl$$

Aethylchlorid und Wasser — Alkohol und Salzsäure

Man bezeichnet diese hydrolytische Spaltung der Ester als Verseifung, weil mit Hilfe der hydrolytischen Spaltung von Fettsäureestern des Glyzerins durch Natronlauge die Seifen dargestellt werden.

Die Verseifung wird häufig schon durch Wasser zustande gebracht; immer gelingt sie mit Alkalien, nötigenfalls mit alkoholischem Kali; dabei entstehen dann nicht die freien Säuren, sondern deren Alkalisalze neben den Alkoholen.

$$CH_3COOC_2H_5 + NaOH = CH_3COONa + C_2H_5OH$$

Die Estergruppe ist lange nicht so reaktionsfähig, wie andere Gruppen, z. B. Hydroxyl, Carboxyl usw. Durch Ammoniak werden die Ester in Säureamide übergeführt.

$$CH_3C\begin{matrix}{\scriptstyle /\!\!/O}\\ {\scriptstyle \backslash}OC_2H_5\end{matrix} + NH_3$$

Aethylacetat — Ammoniak

$$\rightarrow CH_3C\begin{matrix}{\scriptstyle /\!\!/O}\\ {\scriptstyle \backslash}NH_2\end{matrix} + HOC_2H_5$$

Acetamid — Alkohol

Mit Phosphorpentachlorid entstehen Säurechloride und Alkylchloride.

$$CH_3C\begin{matrix}{\scriptstyle /\!\!/O}\\ {\scriptstyle \backslash}OC_2H_5\end{matrix} + PCl_5$$

Aethylacetat — Phosphorpentachlorid

$$\rightarrow CH_3C\begin{matrix}{\scriptstyle /\!\!/O}\\ {\scriptstyle \backslash}Cl\end{matrix} + ClC_2H_5 + POCl_3$$

Acetylchlorid — Aethylchlorid

Organische Ester sind zu mancherlei Kondensationsreaktionen fähig (siehe „Essigester" und „Acetessigester", Abschnitt 29).

Ferner vermögen die Ester mit magnesiumorganischen Verbindungen unter Kohlenstoffsynthese zu reagieren und werden daher in der synthetischen Chemie zum Aufbau von Ketonen und tertiären Alkoholen verwandt. Die sehr reaktionsfähigen magnesiumorganischen Verbindungen entstehen durch Einwirkung von Magnesium auf Halogenalkyle; sie lagern sich an die Ketogruppe des organischen Esters an, wobei Kohlenstoff an Kohlenstoff tritt. Die zunächst entstehende Additionsverbindung wird durch Wasser gespalten, wobei die neue Kohlenstoffbindung erhalten bleibt.

$$C_6H_5Br + Mg \rightarrow C_6H_5MgBr$$

Brombenzol — Magnesiumbrombenzol

$$C_6H_5C\begin{matrix}{\scriptstyle /\!\!/O\cdots MgBr}\\ \qquad\qquad C_6H_5\\ {\scriptstyle \backslash}OC_2H_5\end{matrix}$$

Benzoesäureäthylester

$$\longrightarrow C_6H_5C\begin{cases}OMgBr\\C_6H_5\\OC_2H_5\end{cases} + H_2O$$

Additionsverbindung

$$\longrightarrow C_6H_5\overset{O}{\overset{\|}{C}}C_6H_5 + Mg\begin{cases}Br\\OH\end{cases} + C_2H_5OH$$

Benzophenon.

Digitized by Google

7. Beeinflussung anderer Gruppen. Sind andere Gruppen im Molekül vorhanden, wie z. B. in einem sauren Ester das saure Wasserstoffatom, oder in organischen Verbindungen eine Aldehyd- oder Amido- usw. Gruppe, so wird der Charakter der anderen Gruppe durch die Estergruppe meist nur unwesentlich beeinflußt. Wird eine Carboxylgruppe verestert, wird also ihr reaktionsfähiges Wasserstoffatom durch Alkyl ersetzt, so wird ihre Eigentümlichkeit vernichtet. So ist z. B. der Benzoesäure-Aethylester in seinem Verhalten dem Benzol ähnlicher als der Benzoesäure.

C_6H_5COOH	$C_6H_5COOCH_3$	C_6H_6
Benzoesäure	Methylester	Benzol

Die Ester der Amidosäuren verhalten sich ähnlich wie primäre, anderweitig nicht substituierte Amine.

NH_2CH_2COOH	$NH_2CH_2COOCH_3$
Amidoessigsäure	Methylester

$NH_2CH_2CH_3$
Aethylamin

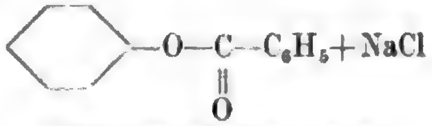
8. Anwendung der Ester. Da Zahl und Art der Ester sehr verschieden ist, so haben sie auch die verschiedenste Art der Verwendung gefunden. Die Ester der Schwefelsäure und Salzsäure werden zur Einführung von Alkyl in der synthetischen Chemie verwandt. Ester der Salpetersäure sind wichtige Sprengstoffe. Die organischen Ester dienen teils als Lösungsmittel, teils werden sie ihres Geruches wegen als Fruchtessenzen verwandt. In der synthetischen Chemie werden sie zu Kondensationen (vgl. Abschnitt 29 „Acetessigester") und zur Reaktion mit magnesiumorganischen Verbindungen gebraucht. Endlich sind die Wachse und die Fette organische Ester, auch ist eine Art der Kunstseide (Acetatseide) ein Ester der Zellulose.

9. Anwendung der Esterifizierung. 9a) Schutz von OH und COOH-Gruppen. Wie oben erwähnt, ist die Estergruppe weniger reaktionsfähig als die Hydroxyl- oder die Carboxylgruppe. Viele Säuren sind in freier Form zersetzlich, als Ester haltbar; manche (Orthosäureester) sind nur als Ester existenzfähig. Von dieser Stabilität der Ester macht man Gebrauch, indem man bei Reaktionen etwa vorhandene Hydroxyl- oder Carboxylgruppen verestert, um sie unversehrt zu erhalten. 1. Beispiel: Schutz einer Hydroxylgruppe. Bei der Synthese der Benzoylbenzoesäure wird Oxybenzoesäurechlorid gebraucht. Da sich aber Oxybenzoesäure nicht ohne Veränderung der Hydroxylgruppe in das Chlorid verwandeln läßt, so verestert man die Hydroxylgruppe und chloriert dann. Das nunmehr entstehende Chlorid wird zur Synthese verwandt. 2. Beispiel: Schutz einer Carboxylgruppe. Gemenge von Amidosäuren, wie sie bei der Spaltung des Eiweißes entstehen, lassen sich nicht unzersetzt durch Destillation trennen. Man verestert daher die Carboxylgruppe mit Alkohol und Salzsäure und kann nun die entstehenden Ester durch fraktionierte Destillation trennen und reinigen und danach wieder zu den freien Säuren verseifen.

9b) Reinigung und Charakterisierung von Phenolen. Um Verbindungen vom Typus des Phenols, die oft schlecht kristallisieren, zu reinigen, führt man sie in ihre gut kristallisierenden Essigsäure- oder Benzoesäureester über („Acetylierung" und „Benzoylierung"), indem man die Alkalisalze der Phenole mit Essigsäureanhydrid oder Benzoylchlorid behandelt. Bei der Beschreibung neuer Phenole stellt man meistens auch diese Ester, die sogenannten Acetyl- und Benzoylverbindungen dar, da sie wegen ihres scharfen Schmelzpunktes gut zu charakterisieren sind.

Phenolnatrium

Cl—C—C_6H_5
‖
O
Benzoylchlorid



Benzoesäurephenylester

9c) Erkennung der Zahl von Hydroxylgruppen. Um die Zahl freier Hydroxylgruppen in fraglichen Verbindungen, besonders in Kohlehydraten, zu bestimmen, führt man sie vollkommen in die Essigsäureester über, reinigt diese, verseift dann eine gewogene Menge Substanz mit einer gewogenen Menge Alkali und bestimmt durch Titrieren des übriggebliebenen Alkalis, wie viel Essigsäure an das Molekül gebunden war, d. h. wie viel Hydroxylgruppen im Molekül vorhanden sind.

10. Esterbildung und Verseifung. 10a) Das Gleichgewicht. Säuren und Alkohole wirken meistens nur langsam aufeinander ein. Durch Erwärmen im geschlossenen Rohr wird die Esterbildung beschleunigt, doch so geht sie nicht vollständig zu Ende, sondern sie macht bei einem Gleichgewicht halt. Dasselbe Gleichgewicht kann auch von der anderen Seite erreicht werden, wenn man die entsprechenden Mengen Wasser und Ester aufeinander einwirken läßt.

$$\underset{\text{Säure}}{CH_3COOH} + \underset{\text{Alkohol}}{C_2H_5OH} \rightleftarrows \underset{\text{Ester}}{CH_3CO_2C_2H_5} + \underset{\text{Wasser}}{H_2O}$$

Läßt man äquivalente Mengen aufeinander einwirken, bringt man also z. B. entweder 1 Molekül Essigester (60 g) und 1 Molekül Alkohol (46 g) oder 1 Molekül Aethyl-

Digitized by Google

acetat (88 g) und 1 Molekül Wasser (18 g) zusammen, so bildet sich nach genügend langer Zeit in beiden Fällen ein homogenes Gemenge von der gleichen Zusammensetzung:

$^1/_3$ Mol Essigsäure + $^1/_3$ Mol Alkohol + $^2/_3$ Mol Wasser + $^2/_3$ Mol Ester

Wendet man verschiedene Alkohole auf die gleiche Säure an, so steigt mit dem Molgewicht des Alkohols die Menge des gebildeten Esters. Sekundäre Alkohole liefern weniger Ester als die isomeren primären, tertiäre weniger als die sekundären.

Die obige Gleichgewichtsbeziehung läßt sich nach dem Massenwirkungsgesetz in folgende Gleichung kleiden, in der C die Konzentration bedeutet, K eine Konstante.

$$\frac{C_{Säure} \times C_{Alkohol}}{C_{Ester} \times C_{Wasser}} = K \quad C_{Ester} = \frac{C_{Säure} \times C_{Alkohol}}{C_{Wasser} \times K}$$

Demnach kann man die Ausbeute an Ester d. h. C_{Ester} erhöhen, indem man die Konzentration von Säure oder Alkohol groß wählt. Man muß z. B., wenn man etwas Säure vollständig verestern will, mit einem großen Ueberschuß von Alkohol arbeiten. Oder man kann die Konzentration des Wassers und zwar am besten durch chemische Bindung vermindern, wie es z. B. durch den Zusatz von Schwefelsäure bei der Darstellung organischer Ester geschieht.

Für die Verseifung ergibt sich die aus obiger Gleichung abzuleitende Formel:

$$C_{Säure} = \frac{C_{Ester} \times C_{Wasser}}{C_{Alkohol}} \cdot K$$

Das Gleichgewicht wird also durch Wasser zugunsten von Säure und Alkohol verschoben; in der Tat kann man mit viel Wasser die in Wasser löslichen Ester gänzlich verseifen. Auch kann man die Verseifung dadurch vollenden, daß man die entstehende Säure durch Alkalien bindet und aus dem Gleichgewicht entfernt. So werden die Fettsäureester des Glycerins durch Alkali zu fettsaurem Alkali (Seife) und freiem Glycerin verseift. Man vergleiche den Artikel „Chemisches Gleichgewicht".

10b) Die Reaktionsgeschwindigkeit. Durch Katalysatoren wird die sonst sehr geringe Geschwindigkeit der Esterbildung und Verseifung gesteigert.

α) Anorganische Katalysatoren. Am besten wirken anorganische Säuren, besonders Schwefelsäure und Salzsäure, die schon in geringer Menge große Mengen Säure bei Gegenwart von überschüssigem Alkohol zu verestern vermögen. Bei der gebräuchlichen Methode der Darstellung von organischen Estern, Kochen der Säure mit alkoholischer Salzsäure oder Schwefelsäure, hat die Salzsäure also den doppelten Zweck, die Geschwindigkeit zu erhöhen und durch chemische Bindung des entstehenden Wassers das Gleichgewicht zugunsten der Estermenge zu verschieben.

Die Verseifung wird ebenfalls durch Säuren beschleunigt. In verdünnter wässeriger Lösung ist die Geschwindigkeit, mit der sich ein Ester verseift, proportional der Anzahl der vorhandenen Wasserstoffionen: diese sind also der katalytisch wirksame Teil der zugesetzten Säure. Man kann diese Eigenschaft benutzen, um die Wasserstoffionenkonzentration unbekannter Säuren zu messen, indem man der Lösung der Säure Essigsäuremethylester zusetzt und dessen Verseifungsgeschwindigkeit durch Titration bestimmt. Die Methode ist besonders zur Bestimmung der Hydrolyse von Salzen angewandt worden.

In konzentrierten Lösungen oder bei Abwesenheit von Wasser ist die katalytische Wirkung der Säure nicht mehr der Wasserstoffionenkonzentration proportional, vielmehr scheinen sich Komplexe des Wasserstoffions mit Alkohol zu bilden, die katalytisch stark wirksam sind und durch Wasser zerstört werden.

$$\underset{\text{Komplexion}}{[C_2H_5OH\ldots H]^+} + H_2O \rightarrow \underset{\text{Wasserstoffion in wässeriger Lösung}}{[H_2O\ldots H]^+} + C_2H_5OH$$

Durch Zusatz von etwas Wasser wird nämlich die katalytische Wirkung der Säure stark vermindert.

Am besten wird die Verseifung durch Alkalien zustande gebracht, deren Hydroxylionen die Geschwindigkeit sehr erhöhen. Man vergleiche den Artikel „Chemische Kinetik".

β) Organische Katalysatoren. Die Fettsäureester des Glycerins werden durch gewisse Fermente gespalten und durch dieselben Fermente aus Fettsäure und Glycerin aufgebaut (vgl. darüber die Artikel „Fermente" und „Fette").

II. Spezieller Teil.

A. Ester der anorganischen Säuren.

11. **Ester der Halogenwasserstoffsäuren, Halogenalkyle.** Die Ester der Halogenwasserstoffsäuren kann man auch auffassen als die Halogensubstitutionsprodukte der Kohlenwasserstoffe, z. B. den Aethylester der Salzsäure als chloriertes Aethan.

$$\underset{\text{Alkohol}}{C_2H_5OH} + \underset{\text{Salzsäure}}{HCl} = \underset{\text{Aethylchlorid}}{C_2H_5{-}Cl} + H_2O$$

$$\underset{\text{Aethan}}{C_2H_6} + \underset{\text{Chlor}}{Cl_2} = \underset{\text{Monochloräthan}}{C_2H_5{-}Cl} + HCl$$

Demgemäß bezeichnet man die Ester entweder entsprechend den anderen Estern als Halogenide, z. B. Aethychlorid, Jodäthyl, oder als substituierte Kohlenwasserstoffe, also Monochloräthan, Trichlormethan.

Bildungsweisen: 1. Aus Paraffinen. Beim Behandeln mit Halogen entstehen Gemenge von Substitutionsprodukten, die nicht zu trennen sind.

Digitized by Google

2. Aus Alkylenen. Durch Anlagerung von Halogenwasserstoff entstehen Halogenalkyle:

$$\begin{matrix} H_2C\cdot\cdot \\ \| \\ H_2C\cdot\cdot \end{matrix} + \begin{matrix} H \\ \\ Cl \end{matrix} \longrightarrow \begin{matrix} H_3C \\ | \\ H_2{-}C{-}Cl \end{matrix}$$

Aethylen — Aethylchlorid.

3. Aus Alkoholen und Halogenwasserstoffsäuren, wobei zur Bindung des entstehenden Wassers Schwefelsäure oder Zinkchlorid zugesetzt wird.

$$\begin{matrix} H_2C{-}OH \\ | \\ CH_3 \end{matrix} \quad HCl \longrightarrow \begin{matrix} H_2CCl \\ | \\ CH_3 \end{matrix}$$

4. Aus Alkoholen mit Phosphorpentachlorid, Phosphortribromid und Phosphortrijodid (über Phosphortrichlorid vgl. weiter unten, Abschnitt 22).

$$PCl_5 + C_2H_5OH = C_2H_5Cl + POCl_3 + HCl$$

$$P\begin{matrix} J \\ J \\ J \end{matrix} + \begin{matrix} HOCH_3 \\ HOCH_3 \\ HOCH_3 \end{matrix} = \begin{matrix} CH_3J \\ CH_3J \\ CH_3J \end{matrix} + P\begin{matrix} OH \\ OH \\ OH \end{matrix}$$

Eigenschaften: Angenehm riechende Gase bezw. Flüssigkeiten, in Wasser kaum, in Alkohol und Aether leicht löslich. Das Halogen ist in ihnen zu zahlreichen Umsetzungen geeignet, sie werden daher als Alkylierungsmittel verwendet. Am reaktionsfähigsten sind die Jodverbindungen, dann folgen die Brom-, dann die Chlorverbindungen. Ueber Veresterung mit Jodalkylen vergleiche z. B. Abschnitte 15, 16, 19, 24.

Mit Magnesium geben die Halogenalkyle magnesiumorganische Verbindungen z. B. C_2H_5MgBr, die zu Synthesen verwendet werden. An Ammoniak und Amine addieren sie sich zu Aminbasen.

$$H_3N + JCH_3 \longrightarrow H_3N\begin{matrix} CH_3 \\ J \end{matrix}$$

$$CH_3NH_2 + JCH_3 \longrightarrow H_2N(CH_3)_2J$$

Methylamin — Dimethylammoniumjodid.

Monofluormethan, Methylfluorid CH_3F, Gas, Kp —78°.

Monochlormethan, Methylchlorid, Chlormethyl CH_3Cl, Gas, Kp —24°. Wird zur Kälteerzeugung verwandt.

Monochloräthan, Aethylchlorid, Chloräthyl. C_2H_5Cl, Kp 12,5°.

Methylbromid, CH_3Br, Kp 4,5°.

Aethylbromid C_2H_5Br, Kp 38°, wird als Aether bromatus in der Medizin als Narcoticum verwendet.

Monojodmethan, Jodmethyl, Methyljodid CH_3J, Kp 43°, schwere, süßlich riechende, stark lichtbrechende Flüssigkeit. Darstellung aus Methylalkohol, Phosphor und Jod, wobei sich intermediär Phosphorjodid bildet, das mit dem Methylalkohol nach obenstehender Gleichung reagiert.

Aethyljodid, Jodäthyl C_2H_5J, Kp 72°.

Allyljodid $CH_2 = CH{-}CH_2J$, der Jodwasserstoffester des Allylalkohols, enthält das Jod in besonders reaktionsfähiger Art locker gebunden.

Die Monohalogensubstitutionsprodukte des Benzols sind als Halogenwasserstoffsäureester des Phenols aufzufassen. Das Halogen ist in ihnen sehr fest gebunden.

Phenol — Chlorbenzol (Phenylchlorid)

Chlorbenzol, C_6H_5Cl, flüssig, Kp 132°, aus Benzol und Chlor bei Gegenwart von Antimonpentachlorid.

Brombenzol C_6H_5Br, Kp 155°. Jodbenzol C_6H_5J, Kp 188° bildet mit Chlor Phenyljodidchlorid $C_6H_5JCl_2$.

p-Chlortoluol $ClC_6H_4CH_3$, Kp 163°, Benzylchlorid $C_6H_5CH_2Cl$, Kp. 176°, isomer mit dem vorigen, enthält aber das Chlor in der aliphatischen Seitenkette (Salzsäureester des Benzylalkohols). Das Chloratom ist zu Umsetzungen fähig.

Triphenylmethylchlorid, Salzsäure-Ester des Triphenylcarbinols, eines komplizierteren Alkohols, ist in Schwefeldioxydlösung in Ionen gespalten, verhält sich also wie ein Salz (vgl. Abschnitt 13).

Kohlenwasserstoffe, die mehr als ein Halogen enthalten, sind als Ester mehrwertiger Alkohole aufzufassen, sie sind im Artikel „Aliphatische Kohlenwasserstoffe" näher behandelt.

Aethylidenchlorid CH_3CCl_2H, Kp 60°, ist der Salzsäureester des (unbekannten) Hydrats des Acetaldehyds $CH_3CH(OH)_2$.

Aethylenchlorid CH_2ClCH_2Cl, Kp 84°, isomer mit dem vorigen, ist der Ester des Glycols CH_2OHCH_2OH.

Chloroform $CHCl_3$, Kp 61,5°, ist der Ester des (unbekannten) Trioxymethans $CH(OH)_3$ (Hydrat der Ameisensäure).

Benzalchlorid, $C_6H_5CHCl_2$, Kp 213°, aus Toluol mit Chlor, gibt beim Verseifen Benzaldehyd C_6H_5CHO.

12. Ester der unterchlorigen Säure. Sie sind durch Einwirkung von Alkohol auf konzentrierte wässerige unterchlorige Säure erhalten worden. Methylhypochlorit, Unterchlorigsäuremethylester CH_3OCl, stechend riechendes explosives Gas. Aethylester, gelbe Flüssigkeit, Kp 36°.

13. Ester der Ueberchlorsäure. Aethylperchlorat $C_2H_5ClO_4$, sehr explosive Flüssigkeit. Triphenylmethylperchlorat

$$\begin{matrix} C_6H_5 \\ C_6H_5 \\ C_6H_5 \end{matrix} C{-}ClO_4.$$

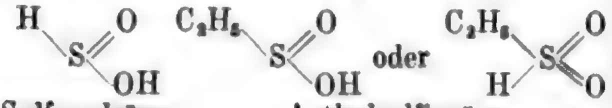
Digitized by Google

rotgelbe Kristalle, ist in Lösung elektrolytisch dissoziiert, hat also die Eigenschaften eines Salzes.

Ester der chlorigen und der Chlorsäure sind nicht bekannt.

14. Ester des Schwefelwasserstoffs. Schwefelwasserstoff vermag als zweibasische Säure sowohl saure wie neutrale Ester zu bilden. Erstere heißen Merkaptane, letztere Sulfide oder Thioäther (vgl. die Artikel „Organische Verbindungen der Metalle und Nichtmetalle" und „Thioverbindungen").

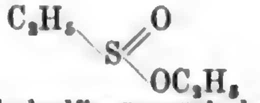
15. Ester der (unbekannten) Sulfoxylsäure. Von der Sulfoxylsäure leiten sich durch Ersatz eines am Schwefel stehenden Wasserstoffatoms durch Alkyl die Sulfinsäuren ab, die somit als saure Ester der Sulfoxylsäure aufzufassen sind (vgl. die Artikel „Organische Verbindungen der Metalle und Nichtmetalle" und „Sulfoverbindungen").



Sulfoxylsäure Aethylsulfinsäure

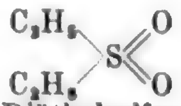
Die Sulfinsäuren bilden 2 Reihen neutraler Ester, die sich durch den Ort der Bindung des Alkyls unterscheiden.

a) Alkyl an Sauerstoff gebunden, Aethylsulfinsäureester. Entstehen aus den Sulfinsäuren durch Verestern mit Alkohol und Salzsäure.



Aethylsulfinsäureäthylester

b) Alkyl an Schwefel gebunden, Sulfone. Entstehen aus den Alkalisalzen der Sulfinsäuren mit Jodalkylen, ferner durch Oxydation der Thioäther.



Diäthylsulfon

(vgl. den Artikel „Sulfoverbindungen").

16. Ester der schwefligen Säure. Die empirische Formel der schwefligen Säure H_2SO_3 läßt zwei Strukturformeln zu:

symmetrische schweflige Säure. unsymmetrische schweflige Säure.

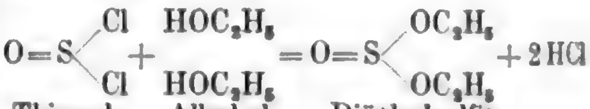
Welche Formel der freien Säure zukommt, ist unentschieden. Von beiden Formeln leiten sich Ester ab.

16a) Ester der symmetrischen schwefligen Säure. *α*) Saure Ester. Alkylschweflige Säuren. Die freien Säuren sind nicht existenzfähig. Ihre Salze sind durch Einleiten von Schwefeldioxyd in Natriumalkoholatlösungen erhalten worden.

Natrium-äthylat. Schwefel-dioxyd. äthylschwefligsaures Natrium.

Durch verschiedene Reagentien werden sie in die isomeren beständigen alkylsulfonsauren Salze umgelagert (siehe unten).

β) Neutrale Ester. Dialkylsulfite. Sie entstehen durch Einwirkung von Thionylchlorid auf Alkohole.

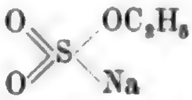


Thionylchlorid Alkohol Diäthylsulfit

Es sind wasserunlösliche, pfefferminzähnlich riechende Flüssigkeiten, die sehr schwer verseift und durch verschiedene Reagentien in die isomeren Alkylsulfonsäureester (siehe unten) umgelagert werden.

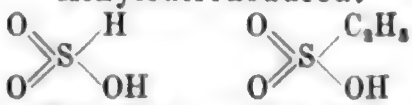
Schwefligsäuredimethylester, Dimethylsulfit, $SO_3(CH_3)_2$, Kp 121°; Diäthylsulfit, Kp 161°; Dipropylsulfit, Kp 191°.

16b) Ester der unsymmetrischen schwefligen Säure. *α*) Saure Ester. 1. Der am Sauerstoff sitzende Wasserstoff ist durch Alkyl ersetzt: möglicherweise haben die oben besprochenen äthylschwefligsauren Salze die folgende, hierher gehörige Konstitution:



2. Der am Schwefel sitzende Wasserstoff ist durch Alkyl ersetzt:

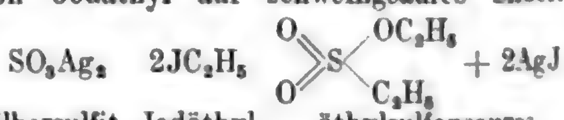
Alkylsulfonsäuren.



schweflige Säure Aethylsulfonsäure

(vgl. den Artikel „Sulfoverbindungen").

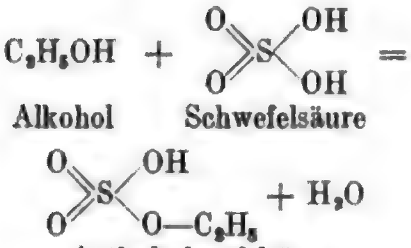
β) Neutrale Ester. Alkylsulfonsäureester. Sie entstehen durch Einwirkung von Jodäthyl auf schwefligsaures Silber.



Silbersulfit Jodäthyl äthylsulfonsaures Aethyl

17. Ester der Schwefelsäure. 17a) Saure Ester. Alkylschwefelsäuren. Sie entstehen 1. durch Einwirkung von Alkoholen auf Schwefelsäure.

Digitized by Google

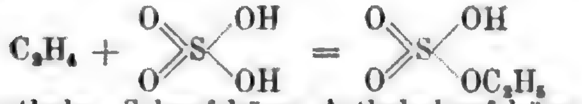


Alkohol Schwefelsäure

Aethylschwefelsäure.

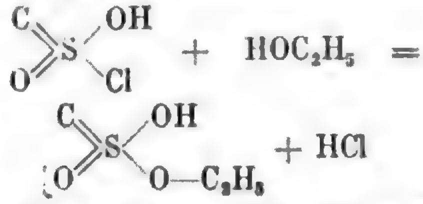
Ihre Calcium- und Bariumsalze sind leicht in Wasser löslich und kristallisieren gut, lassen sich also leicht von Sulfat trennen. Die freien Säuren werden aus den gereinigten Bariumsalzen mit der berechneten Menge Schwefelsäure abgeschieden.

2. durch Addition ungesättigter Kohlenwasserstoffe an konzentrierte Schwefelsäure:



Aethylen Schwefelsäure Aethylschwefelsäure

3. durch Einwirkung von Chlorsulfonsäure auf Alkohol.



Die freien Säuren sind dicke Flüssigkeiten; leicht löslich in Wasser. Es sind starke Säuren von hohem Dissoziationsgrad; ihre Salze kristallisieren gut. Durch Erhitzen mit Wasser werden sie in Alkohol und Schwefelsäure gespalten. Beim trockenen Erhitzen zerfallen sie in ungesättigte Kohlenwasserstoffe und Schwefelsäure; auf dieser Eigenschaft beruht die Darstellung des Aethylens aus Schwefelsäure und Alkohol.

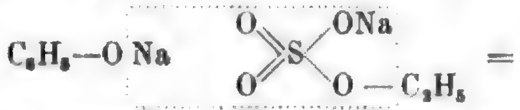
$$C_2H_5OH + H_2SO_4 \rightarrow$$

Alkohol Schwefelsäure

$$C_2H_5SO_4H + H_2O \rightarrow C_2H_4 + H_2SO_4$$

Aethylschwefelsäure Aethylen.

Die alkylschwefelsauren Salze werden vielfach ebenso wie die Halogenalkyle zum Alkylieren angewandt, da sie ihr Alkyl leicht abgeben, z. B.



Natriumphenolat Aethylschwefelsaures Natrium.

$$C_6H_5-O-C_2H_5 + Na_2SO_4$$

Aethyläther des Phenols.

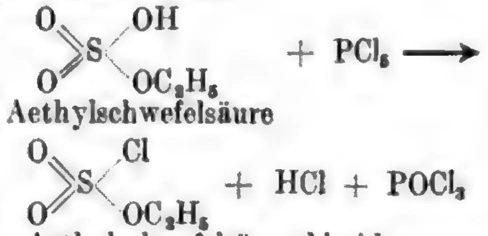
Methylschwefelsäure SO_4HCH_3, dicker Sirup.

Aethylschwefelsäure $SO_4HC_2H_5$, Sirup, sehr leicht in Wasser löslich.

Kaliumsalz $SO_4KC_2H_5$, wasserfreie monokline Tafeln.

Bariumsalz $(SO_4C_2H_5)_2Ba + 2H_2O$, leicht in Wasser löslich.

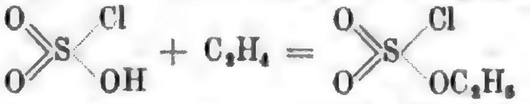
Die Chloride der Alkylschwefelsäuren entstehen aus ihnen durch Einwirkung von Phosphorpentachlorid.



Aethylschwefelsäure

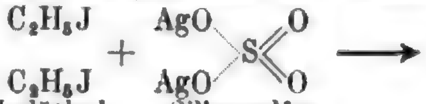
Aethylschwefelsäurechlorid

Aethylschwefelsäurechlorid, $C_2H_5SO_3Cl$, wird am einfachsten durch Einleiten von Aethylen in Chlorsulfonsäure hergestellt:



es ist eine stechend riechende Flüssigkeit. Sie kann zum Aethylieren verwandt werden.

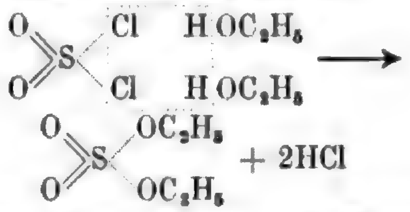
17b) Neutrale Ester der Schwefelsäure. Bildungsweisen: 1. Durch Einwirkung von Alkyljodiden auf Silbersulfat.



Jodäthyl Silbersulfat

Diäthylsulfat.

2. Durch Einwirkung von Sulfurylchlorid oder Chlorsulfonsäure auf Alkohol



Eigenschaften: Schwere, in Wasser unlösliche, unzersetzt siedende Flüssigkeiten. Mit Wasser werden sie verseift. Sie sind sehr giftig, bewirken starke Entzündung der Atmungsorgane, ferner Konvulsionen, Coma und Lähmung.

Die Schwefelsäureester werden vielfach zum Alkylieren verwandt und haben in neuerer Zeit das Jodmethyl und Jodäthyl großenteils verdrängt. Phenole, Amine und organische Säuren werden leicht von ihnen alkyliert.

Schwefelsäuredimethylester, Dimethylsulfat $SO_4(CH_3)_2$, Kp 188°, Diäthylester, Kp 208°, Diisoamylester, Kp 150° bei 20 mm.

18. **Ester der selenigen und Selensäure**

Diäthylselenit $SeO_3(C_2H_5)_2$, Kp 183°, unter Zersetzung. Wird durch Wasser verseift.

Digitized by Google

Aethylselensäure $SeO_4HC_2H_5$, aus Selensäure und Alkohol, sehr unbeständig. Die Salze sind isomorph mit den entsprechenden äthylschwefelsauren Salzen.

19. Ester der untersalpetrigen Säure. Untersalpetrigsaures Aethyl, Diazoäthoxan $C_2H_5—O—N = N—O—C_2H_5$ entsteht aus untersalpetrigsaurem Silber mit Jodäthyl. Farblose in Wasser unlösliche Flüssigkeit, sehr explosiv.

20. Ester der salpetrigen Säure. Von der salpetrigen Säure lassen sich zwei Reihen von Derivaten ableiten, je nachdem das Alkyl an Stickstoff oder Sauerstoff gebunden ist; erstere bezeichnet man als Nitrokörper, letztere sind die echten Ester der salpetrigen Säure.

$$\genfrac{}{}{0pt}{}{O}{O}\!\!>\!N—H \quad \text{oder} \quad O{=}N—OH$$

salpetrige Säure

$$\genfrac{}{}{0pt}{}{O}{O}\!\!>\!N—C_2H_5 \qquad O{=}N—O—C_2H_5$$

Nitroäthan Aethylnitrit.

Durch Einwirkung von Jodäthyl auf Silbernitrit entstehen beide Arten von Isomeren. Unterschiede beider Isomerer: Die Nitrite sind viel leichter flüchtig als die Nitrokörper. Entsprechend der Struktur lassen sich wohl die Nitrite, nicht aber die Nitrokörper zu Alkohol und salpetriger Säure verseifen.

$$ONO—C_2H_5 \longrightarrow ONOH + HOC_2H_5.$$

Durch naszierenden Wasserstoff werden die Nitrokörper zu Aminen reduziert, die Nitrite verseift. Näheres siehe im Artikel „Nitroverbindungen".

Alkylnitrite. Bildungsweisen: Durch Einwirkung von salpetriger Säure auf Alkohole z. B. in verdünnter wässeriger Lösung. Die Esterbildung geht hier viel schneller vor sich, als bei allen übrigen Säuren; sie verläuft fast mit der Geschwindigkeit einer Ionenreaktion. Da die Alkylnitrite tief sieden, kann man sie dauernd aus dem Reaktionsgemenge abdestillieren und so aus dem Gleichgewicht entfernen.

$$\underset{\text{Alkohol}}{C_2H_5OH} + \underset{\text{salpetrige Säure}}{HO—N—O} \longrightarrow$$

$$\underset{\text{Aethylnitrit.}}{C_2H_5O—NO + H_2O}$$

Eigenschaften: Leicht flüchtige, eigentümlich aromatisch riechende Flüssigkeiten. Der Dampf wirkt eingeatmet erweiternd auf die Blutgefäße ein; die Wirkung äußert sich dadurch, daß man beim Einatmen von Nitriten einen roten Kopf bekommt; die Wirkung geht jedoch rasch vorüber.

Die Alkylnitrite werden sehr rasch verseift.

Salpetrigsäuremethylester oder Methylnitrit CH_3ONO, Kp —12°.

Aethylnitrit C_2H_5ONO, in der Parfümerie verwandt (vgl. Abschnitt 26). Kp +16.

Salpetrigsäureisoamylester oder Amylnitrit $C_5H_{11}ONO$, Kp 96°, gelbliche Flüssigkeit, setzt sich mit Methylalkohol zu Methylnitrit und Amylalkohol um. Wird zum Diazotieren und Nitrosieren verwandt. In der Medizin als „Amylium nitrosum" besonders bei Angina Pectoris gebraucht.

21. Ester der Salpetersäure. Bildungsweisen:

1. Aus Silbernitrat und Jodalkyl

$$\genfrac{}{}{0pt}{}{O}{O}\!\!>\!N—OAg + JC_2H_5 =$$

$$\genfrac{}{}{0pt}{}{O}{O}\!\!>\!N—OC_2H_5 + AgJ.$$

2. Durch Einwirkung von rauchender Salpetersäure auf Alkohol.

$$\genfrac{}{}{0pt}{}{O}{O}\!\!>\!N—OH + HOC_2H_5 \longrightarrow$$

$$\genfrac{}{}{0pt}{}{O}{O}\!\!>\!N—OC_2H_5 + H_2O.$$

Um bei dieser Reaktion das Auftreten von salpetriger Säure, deren Anwesenheit zu Explosionen führen kann, zu verhindern, setzt man Harnstoff zu, der die salpetrige Säure zerstört.

$$\underset{\text{Harnstoff}}{O{=}C\genfrac{}{}{0pt}{}{\diagup NH_2}{\diagdown NH_2}} + \underset{\text{salpetrige Säure}}{\genfrac{}{}{0pt}{}{HNO_2}{HNO_2}} =$$

$$\underset{\text{Wasser}}{3H_2O} + \underset{\text{Kohlensäure}}{O{=}C{=}O} + \underset{\text{Stickstoff.}}{2N_2}$$

Aus dem Reaktionsgemenge lassen sich dann die Ester, falls man Ueberhitzen vermeidet, ohne Explosionsgefahr abdestillieren.

Eigenschaften: Die Alkylnitrate sind explosiv; dies beruht darauf, daß sie einen Teil der zur Verbrennung des organischen Bestandteils nötigen Sauerstoffmenge bereits im Molekül haben. Die Ester niederer Alkohole sind farblose, in Wasser unlösliche, angenehm riechende Flüssigkeiten.

Salpetersaures Methyl, Methylnitrat $CH_3—ONO_2$, Kp 60°, wurde früher technisch hergestellt. Die Fabrikation ist wegen mehrerer verheerender Explosionen aufgegeben.

Salpetersaures Aethyl, Aethylnitrat $C_2H_5—ONO_2$, Kp 86°, wird zum Nitrieren verwandt.

Sehr große technische Bedeutung haben die Salpetersäureester mehrwertiger Alkohole, besonders der neutrale Salpetersäureester

Digitized by Google

des Glycerins (Glycerintrinitrat), das sogenannte Nitroglycerin. Es wird durch Einwirkung von Salpeterschwefelsäure auf Glycerin hergestellt:

$$\begin{array}{lll} CH_2 \cdot OH \ H \cdot ONO_2 & & CH_2-ONO_2 \\ CH \ OH \ H \ ONO_2 & \rightarrow & CH-ONO_2 \\ CH_2 \ OH \ H \ ONO_2 & & CH_2-ONO_2 \end{array}$$

Nitroglycerin ist also kein Nitrokörper, sondern ein Salpetersäureester. In Kieselguhr aufgesaugtes Nitroglycerin ist Dynamit.

Zellulose bildet mit rauchender Salpetersäure ein Hexanitrat $[C_{12}H_{14}O_4(NO_3)_6]_n$, die sogenannte Schießbaumwolle. Sie dient als Ausgangsmaterial zur Darstellung des rauchlosen Pulvers (vgl. den Artikel „Sprengstoffe“).

Ein Tetranitrat der Zellulose $[C_{12}H_{16}O_6(NO_3)_4]_n$ wird in ätherischer Lösung als Collodium verwendet; es dient mit Kampher gemengt als Zelluloid zur Darstellung von photographischen Films und zahlreichen Gebrauchsgegenständen. Bei Darstellung von Kunstseide nach Chardonnet wird Zellulose in ein Nitrat überführt und als solches gesponnen.

22. Ester der phosphorigen und Phosphorsäure. Von den zwei Formeln der phosphorigen Säure

$$P\begin{cases} OH \\ OH \\ OH \end{cases} \qquad O=P\begin{cases} OH \\ OH \\ H \end{cases}$$

symmetrische unsymmetrische
phosphorige Säure

leiten sich zwei Reihen von Estern ab.

1. Die einen haben das Alkyl an Sauerstoff gebunden (echte Phosphorigsäureester); sie entstehen durch Einwirkung von Phosphortrichlorid auf Natriumalkoholat.

$$P\begin{cases} Cl \\ Cl \\ Cl \end{cases} + \begin{matrix} Na\,OCH_3 \\ Na\,OCH_3 \\ Na\,OCH_3 \end{matrix} \longrightarrow$$

Phosphortrichlorid Natriummethylat

$$P\begin{cases} OCH_3 \\ OCH_3 \\ OCH_3 \end{cases} + 3NaCl$$

Trimethylphosphit.

Phosphorigsäuretrimethylester $PO_3(CH_3)_3$, Kp 111° Oel.

Phosphorigsäuretriäthylester $PO_3(C_2H_5)_3$, Kp 156°.

2. Die anderen haben das Alkyl am Phosphor: sie heißen Phosphinsäuren (vgl. den Artikel „Organische Verbindungen der Metalle und Nichtmetalle“).

$$O=P\begin{cases} OH \\ OH \\ C_2H_5 \end{cases}$$

Aethylphosphinsäure.

Phosphorsäuretriäthylester $O=PO_3(C_2H_5)_3$, Kp 211° aus Natriumalkoholat und Phosphoroxychlorid.

23. Ester der Arsenigen-, Arsen-, Bor- und Kieselsäure.

Symmetrischer Arsenigsäuretriäthylester $AsO_3(C_2H_5)_3$, Kp 166°.

Ueber die den Phosphinsäuren entsprechenden Arsinsäuren vgl. den Artikel „Organische Verbindungen der Metalle und Nichtmetalle“.

Arsensäuretriäthylester $OAsO_3(C_2H_5)_3$, Kp 235° aus arsensaurem Silber und Jodäthyl.

Borsäuremethylester $BO_3(CH_3)_3$, Kp 65°, farblose Flüssigkeit, durch Wasser sofort zersetzt. Aethylester Kp 119°.

Die Borsäureester brennen mit grüner Flamme. Diese Eigenschaft wird in der analytischen Chemie zum Nachweis der Borsäure benutzt, indem man die fragliche Substanz mit konzentrierter Schwefelsäure und Alkohol übergießt, wodurch etwa vorhandene Borsäure verestert wird, und dann anzündet.

Orthokieselsäureester entstehen aus Siliciumchlorid und Alkoholen. Unzersetzt flüchtige, unangemehn riechende Flüssigkeiten, die durch Wasser langsam verseift werden. Sie brennen mit weißer Flamme.

Orthokieselsäuremethylester $SiO_4(CH_3)_4$, Kp 120°.

Aethylester $SiO_4(C_2H_5)_4$, Kp 165°.

Siliciumameisensäuretriäthylester $HSiO_3(C_2H_5)_3$, Kp 134°, entspricht dem Orthoameisensäureester in der Kohlenstoffreihe. Darstellung aus Siliciumchloroform und Alkohol.

$$HSi\begin{cases} Cl \\ Cl \\ Cl \end{cases} \begin{matrix} H\,OC_2H_5 \\ H\,OC_2H_5 \\ H\,OC_2H_5 \end{matrix} \longrightarrow HSi\begin{cases} OC_2H_5 \\ OC_2H_5 \\ OC_2H_5 \end{cases}$$

Silicium-chloroform. Alkohol. Ester.

Ester der Chromsäure, Mangansäure und Vanadinsäure sind nicht bekannt.

B. Ester organischer Säuren.

24. Allgemeines. Bildungsweisen: Die Ester organischer Säuren werden nach den allgemeinen Darstellungsweisen erhalten (siehe oben). In der Regel stellt man sie durch Kochen der Säure mit dem Alkohol bei Gegenwart von Schwefelsäure oder Salzsäure dar. Sie werden ferner dargestellt durch Umsetzung von Salzen organischer Säuren mit anorganischen Estern, besonders Estern der Halogenwasserstoffsäuren oder der Schwefelsäure. Als derartige „Alkylierungsmittel“ werden vorzugsweise verwandt Methyl- und Aethyljodid und Dimethyl- und Diäthylsulfat. Falls man mit den Alkalisalzen nicht zum Ziele kommt,

wendet man die Silbersalze zur Umsetzung mit Jodalkyl an, wobei schwerlösliches Jodsilber entsteht.

$$CH_3C{\diagup O \atop \diagdown OAg} + JCH_3 = CH_3C{\diagup O \atop \diagdown OCH_3} + JAg$$

$$CH_3C{\diagup O \atop \diagdown ONa} + \underset{\text{Dimethylsulfat}}{CH_3SO_4CH_3} =$$

$$CH_3{\diagup CO \atop \diagdown OCH_3} + NaSO_4CH_3.$$

Ester lassen sich ferner darstellen, indem man Säuren dampfförmig mit Ameisensäureester über gewisse Katalysatoren leitet.

$$\underset{\text{Isobuttersäure}}{C_3H_7COOH} + \underset{\text{Methylformiat}}{CH_3{-}O{-}\overset{O}{\overset{\|}{C}}{-}H} \quad \underset{\text{bei } 250^0}{\text{über } TiO_2}$$

$$\rightarrow \underset{\text{Methylisobutyrat.}}{C_3H_7COOCH_3} + CO + H_2O$$

Eigenschaften: Die Ester niederer Reihen sind farblose, unzersetzt flüchtige Flüssigkeiten von angenehmem Geruch. Der spezifische Geruch des Weines ist auf seinen Gehalt an Estern zurückzuführen. Viele werden als Fruchtäther technisch verwendet. Die höheren Ester sind kristallisiert, in Alkohol und Aether löslich, in Wasser nur die niederen in geringer Menge.

Reaktionen: Ueber die hydrolytische Spaltung (Verseifung), über die Reaktionen mit Ammoniak, Phosphorpentachlorid und magnesiumorganischen Verbindungen siehe im allgemeinen Teil, Abschnitt 6. Ueber Kondensationsreaktionen vgl. „Acetessigester", Abschnitt 29.

Ebenso wie man durch die Einwirkung von Wasser die Alkylgruppe eines Esters durch Wasserstoff ersetzen kann, vermag man sie durch Einwirkung von Alkoholen bei Gegenwart von Salzsäure gegen ein anderes Alkyl auszutauschen.

$$\underset{\text{Aethylacetat}}{CH_3COOC_2H_5} + \underset{\text{Amylalkohol}}{HOC_5H_{11}} \rightleftarrows$$

$$\underset{\text{Amylacetat}}{CH_3COOC_5H_{11}} + \underset{\text{Aethylalkohol.}}{HOC_2H_5}$$

25. Ester einbasischer Säuren mit niederen Alkoholen. Ester der Ameisensäure. Aus Ameisensäure, Alkohol und Salzsäure. Angenehm riechende Flüssigkeiten.

Methylester, Methylformiat HCO_2CH_3, Kp 32,5°.

Aethylester, Aethylformiat $HCO_2C_2H_5$, Kp 54,4° wird bei der Bereitung künstlichen Rums verwandt.

Ester der Essigsäure. Essigsäuremethylester, Methylacetat $CH_3COO.CH_3$, Fp —100,4°, Kp +57°.

Essigsäureäthylester, Aethylacetat, kurz Essigester oder nach der alten Nomenklatur Essigäther, Aether aceticus $CH_3COO.C_2H_5$, Fp —82,4°, Kp 77,5°, wird technisch durch Destillation von Alkohol mit Schwefelsäure und Essigsäure gewonnen; er wird als Gelatinierungsmittel für Schießbaumwolle, ferner als Lösungsmittel, sowie seines angenehmen Geruchs wegen als Zusatz zu Fruchtsäften, Weinessig usw. verwandt. Er dient als Ausgangsmaterial zur Herstellung des Acetessigesters, siehe unten.

Propylacetat $CH_3COOC_3H_7$, Kp 101,6°.

Isopropylacetat $CH_3COOC_3H_7$, Kp 90°.

Butylacetat $CH_3COOC_4H_9$, Kp 124,5°.

Isobutylcarbinolacetat, Amylacetat, Essigester des Gärungsamylalkohols, $CH_3COO.C_5H_{11}$, Kp 140°, riecht nach Birnen. Wird als Brennflüssigkeit der Hefnerschen Normalkerze in der Photometrie verwandt.

n-Hexylacetat, Kp 169°, und n-Octylacetat, Kp 207°, kommen im Heracleum-Oel vor.

Ester der Propionsäure. Methylester $C_2H_5COOCH_3$, Kp 79,5°. Aethylester, Kp 98,8°. Isoamylester, Kp 160°, riecht nach Ananas.

Ester der Buttersäure. Methylester $C_3H_7COOCH_3$, Kp 102,3°, riecht nach Reinetten. Aethylester, Kp 120, riecht nach Ananas. Isoamylester, Kp 178, riecht nach Birnen. n-Hexylester, Kp 205, und n-Octylester, Kp 244, finden sich im Heracleum-Oel.

Valeriansäureäthylester $C_4H_9COOC_2H_5$, Kp 144°.

Isovaleriansäureäthylester $C_4H_9COOC_2H_5$, Kp 135°.

Isovaleriansäurisoamylester $C_4H_9COO{-}C_5H_{11}$, Kp 194°, riecht nach Aepfeln.

Caprinsäureisoamylester $C_9H_{19}COO{-}C_5H_{11}$, Kp 275°—290°, sogenannter Oenanthäther, im Weinfuselöl; verursacht den charakteristischen Geruch des Weins.

26. Fruchtäther. Ihres Geruches wegen werden Ester als „Fruchtäther" in der Parfümerie verwandt. Im folgenden ist die Zusammensetzung einiger technischer Aether gegeben.

Ananasäther: 130 g Amylvalerianat, 30 g Aethylbutyrat, 840 g Alkohol.

Apfeläther: 100 g Amylvalerianat, 50 g Aethylnitrit, 50 g Aethylacetat, 7,5 g Acetaldehyd, 792,5 g Alkohol.

Birnenäther: 200 g Amylacetat, 100 g Aethylnitrit, 50 g Aethylacetat, 650 g Alkohol.

Pfirsichäther: 100 g Amylvalerianat, 20 g Aethylacetat, 100 g Amylbutyrat, 10 g Benzaldehyd, 770 g Alkohol.

27. Ester höherer Alkohole. Ester von hochmolekularen einwertigen Alkoholen fin-

Digitized by Google

den sich in der Natur im Walrat und in den Wachsarten (s. unten Wachs).

Palmitinsäurecetylester $C_{15}H_{31}COOC_{16}H_{33}$ wachsglänzende Blättchen, Fp 49°.

Palmitinsäuremyricylester $C_{15}H_{31}COOC_{30}H_{61}$, im Bienenwachs.

28. Ester mehrwertiger Alkohole. Es können (vgl. oben Abschnitt 4) alle oder nur eine oder einige Hydroxylgruppen und zwar mit verschiedenen Säuren verestert sein. Es gibt daher hydroxylhaltige (basische) Ester, neutrale, einfache und gemischte Ester.

Beispiele: a) Monoester: Glycolmonoacetat,

$$\begin{array}{l} CH_2{-}OH \\ | \\ CH_2{-}O{-}COCH_3 \end{array} \quad \text{Kp } 182^\circ$$

mit Wasser mischbare Flüssigkeit, aus den Halogenhydrinen mit fettsauren Salzen.

$$\begin{array}{l} CH_2\text{-}Cl \\ | \\ CH_2\text{-}OH \end{array} \quad K\text{-}O\text{-}COCH_3 \quad \begin{array}{l} CH_2\text{-}O\text{-}COCH_3 \\ | \\ CH_2OH \end{array} + KCl$$

Glycol-chlorhydrin. Kaliumacetat. Glycolmonoacetat.

b) Neutraler Ester: Glycoldiacetat

$$\begin{array}{l} CH_2{-}O{-}COCH_3 \\ | \\ CH_2{-}O{-}COCH_3 \end{array} \quad \text{Kp } 186^\circ$$

aus 1,2 Dichloräthan mit Kaliumacetat.

$$\begin{array}{l} CH_2\text{-}Cl \\ | \\ CH_2\text{-}Cl \end{array} \begin{array}{l} K\text{-}O\text{-}COCH_3 \\ \\ K\text{-}O\text{-}COCH_3 \end{array} = \begin{array}{l} CH_2\text{-}O\text{-}COCH_3 \\ | \\ CH_2\text{-}O\text{-}COCH_3 \end{array} + 2KCl$$

c) Gemischter Ester: Glycolchloracetin,

$$\begin{array}{l} CH_2Cl \\ | \\ CH_2OCOCH_3 \end{array} \quad \text{Kp } 144^\circ$$

aus Glycolmonoacetat und Salzsäure.

$$\begin{array}{l} CH_2OH \\ | \\ CH_2OCOCH_3 \end{array} + HCl = \begin{array}{l} CH_2Cl \\ | \\ CH_2OCOCH_3 \end{array} + H_2O$$

Ester des Glycerins. Von größter biologischer und technischer Bedeutung sind die neutralen Carbonsäureester des Glycerins, die Fette und Oele. Die wichtigsten derartigen Ester sind die Glycerinester der Buttersäure, Palmitinsäure, Stearinsäure und Oelsäure. Durch Kochen mit Alkalien werden sie hydrolytisch in das Alkalisalz der Säure, die „Seife" und in freies Glycerin gespalten („verseift"). Vgl. den Artikel „Fette, Oele, Seifen".

$$\begin{array}{l} CH_2\text{-}O\text{-}COR + NaOH \\ | \\ CH\text{-}O\text{-}COR + NaOH \\ | \\ CH_2\text{-}O\text{-}COR + NaOH \end{array} \rightarrow \begin{array}{l} CH_2OH + Na\text{-}O\text{-}COR \\ | \\ CHOH + Na\text{-}O\text{-}COR \\ | \\ CHOH + Na\text{-}O\text{-}COR \end{array}$$

Fett — Glycerin — Fettsaures Alkali. Seife

Ein Essigsäureester der Zellulose wird als Kunstseide (Acetatseide) und mit Kampher als „Cellit" zur Fabrikation von Film technisch verwertet.

29. Ester substituierter Fettsäuren. Acetessigester. Die Ester substituierter Säuren werden in der Regel bei den betreffenden Säuren, z. B. Aminosäuren usw. behandelt. Durch eine Estergruppe werden andere Gruppen in der Regel nur unwesentlich modifiziert (siehe oben Abschnitt 7). Beispiele:

Oxyessigsäureäthylester $CH_2OHCOOC_2H_5$, Kp 160°, aus Oxyessigsäure mit Alkohol und Salzsäure.

Amidoessigsäureäthylester $NH_2CH_2COOC_2H_5$, Kp 147°, nach Cacao riechendes Oel. Bildet mit Salzsäure ein Salz.

Diazoessigsäureäthylester $N_2{:}CHCOOC_2H_5$, Kp 143°, aus Amidoessigester mit salpetriger Säure, zersetzt sich unter dem Einfluß von Katalysatoren.

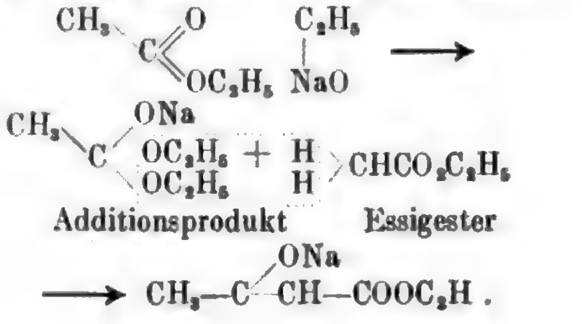
Tritt eine Estergruppe in β-Stellung zur Ketongruppe $\begin{array}{c} C = O \\ | \\ CH_2 \end{array}$ so erlangt diese die Fähigkeit, sich zur Gruppe $\begin{array}{c} C{-}OH \\ \| \\ C - H \end{array}$ umzulagern und saure Eigenschaften anzunehmen.

Acetessigsäureäthylester, Acetessigester $CH_3{-}CO{-}CH_2{-}CO_2C_2H_5$, Kp 181° (72° bei 12 mm).

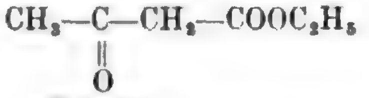
29a) Darstellung des Acetessigesters. Der Acetessigester wird durch Kochen von trockenem Essigester mit Natrium hergestellt.

$$2CH_3CO_2C_2H_5 + Na = CH_3COCH_2CO_2H_5 + C_2H_5ONa + H$$

Da eine Spur Alkohol zum Einleiten der Reaktion notwendig ist, so nimmt man an, daß nicht das Natrium, sondern das erst entstehende Natriumäthylat die Kondensation bewirkt. Der Mechanismus der Kondensation ist nicht aufgeklärt; man kann sich vielleicht folgende Vorstellung machen: es lagert sich Natriumäthylat an Essigester an; das Additionsprodukt reagiert mit Essigester unter Austritt von zwei Mol Alkohol:



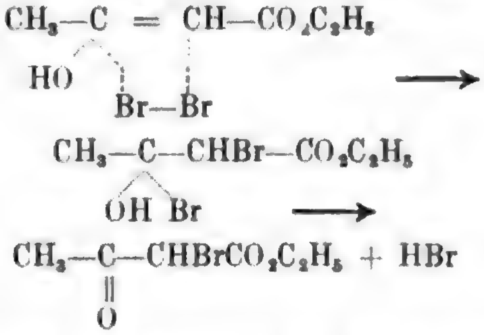
29b) Eigenschaften. Angenehm riechende Flüssigkeit. Die Ketogruppe ist hier derart durch die Estergruppe modifiziert, daß sie sich in die isomere Enolgruppe umzulagern vermag. Acetessigester ist ein Gemenge zweier isomerer Körper, der Ketoform und der Enolform (von en, Ausdruck für Doppelbindung, und ol, Ausdruck für Hydroxylgruppe).



Ketoform.

Enolform

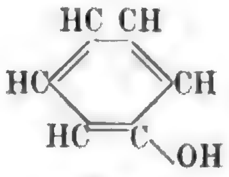
Beide Formen gehen unter Wanderung eines Wasserstoffatoms leicht ineinander über. Diese Art der Isomerie bezeichnet man als Desmotropie (siehe den Artikel „Isomerie"). Die reine Ketoform (echter Acetessigester) ist ein Oel, das bei —41° erstarrt. Die Enolform (Oxycrotonsäureester) ist ein auch im Aetherkohlensäurekältegemisch nicht erstarrendes, stark riechendes Oel. Gewöhnlicher Acetessigester ist ein im Gleichgewicht befindliches Gemenge von 7,4% Enol- und 92,6% Ketoform. Man kann die Enolform quantitativ durch Titration mit titrierter alkoholischer Bromlösung bestimmen, wobei nur die Enolform Brom addiert und entfärbt.



Durch diese Titration hat man ermittelt, daß Acetessigester in verschiedenen Lösungsmitteln beim Gleichgewicht verschiedene Mengen Enol enthält: in Wasser 0,4%, in Chloroform 7%, in Alkohol 12%, in Hexan 50%.

Die Enolform des Acetessigesters hat saure Eigenschaften, ähnlich wie Phenol; offenbar wirkt ebenso wie beim Phenol die benachbarte Doppelbindung auf die Hydroxylgruppe ein.

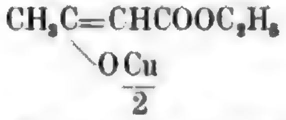
Enolgruppe



Phenol

Als Enolform vermag der Acetessigester Salze zu bilden:

Natracetessigester



Kupferacetessigester

Acetessigester färbt sich in Lösungen mit Eisensalzen violettrot, was auf der Bildung eines dunkelfarbigen Ferrienolsalzes beruht.

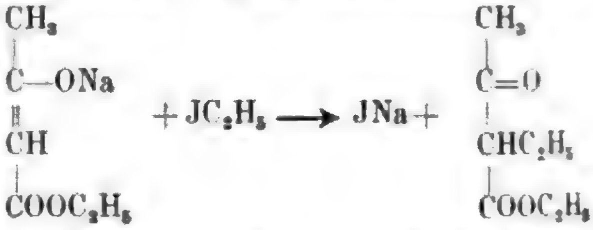
29c) Spaltung des Acetessigesters. Durch Kochen mit konzentrierten Alkalien wird Acetessigester in Essigsäure und Essigester, letzterer weiter in Essigsäure und Alkohol gespalten. Die Reaktion heißt: Säurespaltung.

$$\begin{array}{c} CH_3CO \mid CH_2COO \mid C_2H_5 \\ OH \mid H \qquad H.OH \end{array}$$
$$\longrightarrow CH_3COOH + CH_3COOH + C_2H_5OH$$

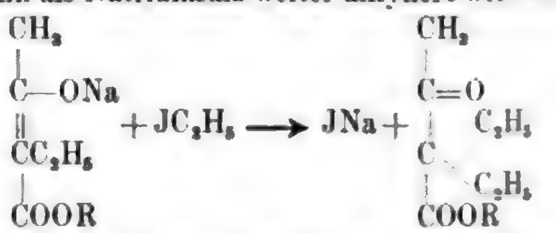
Durch verdünnte Alkalien oder Säuren wird er in Aceton, Kohlensäure und Alkohol gespalten: Ketonspaltung.

$$\begin{array}{c} CH_3COCH_2 \mid COOC_2H_5 \\ H.OH \end{array}$$
$$\longrightarrow CH_3COCH_3 + CO_2 + C_2H_5OH$$

29d) Alkylierung des Acetessigesters. Läßt man auf die Lösung des Natracetessigesters in Alkohol Alkyljodide einwirken, so entstehen alkylierte Acetessigester, in denen das Alkyl am Kohlenstoff gebunden ist. Sie leiten sich nicht von der Enolform, von der ausgehend sie dargestellt sind, sondern von der Ketonform ab.



Der so entstandene Alkylacetessigester vermag sich in ein Enol umzulagern und kann als Natriumsalz weiter alkyliert werden:

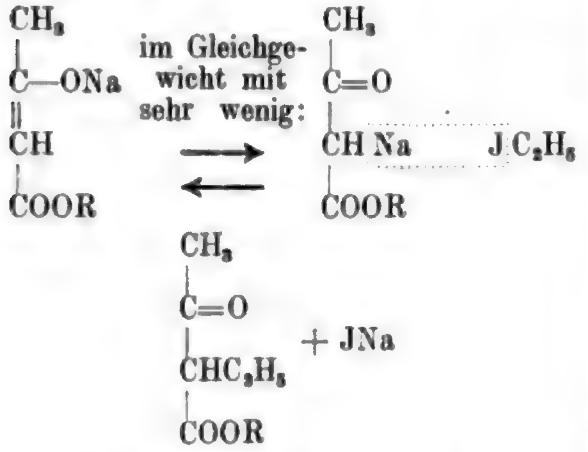


Die nunmehr entstehenden Dialkylacetessigester können sich nicht mehr umlagern.

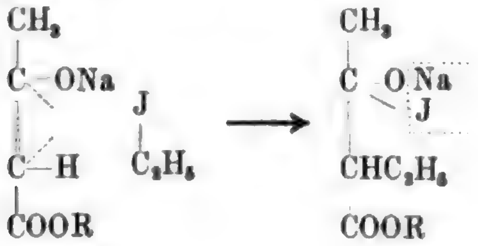
Wenn eine Verbindung bei der Alkylierung das Derivat einer isomeren Form gibt, so bezeichnet man sie als tautomer. Solche tautomere Reaktionen kann man sich auf folgende Weise erklären:

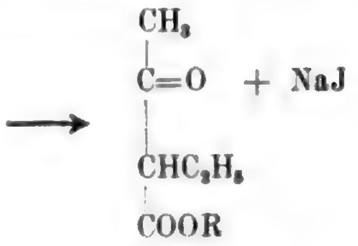
Digitized by Google

1. Man kann annehmen, daß ebenso wie der freie Acetessigester, auch das Natriumsalz in zwei Formen vorhanden ist, deren eine reagiert und stets nachgebildet wird.



2. Man kann annehmen, daß die neuen Verbindungen nicht wie oben durch Austausch des Natriums gegen Alkyl zustande kommen, sondern daß sich das Alkyljodid an die Doppelbindung addiert.

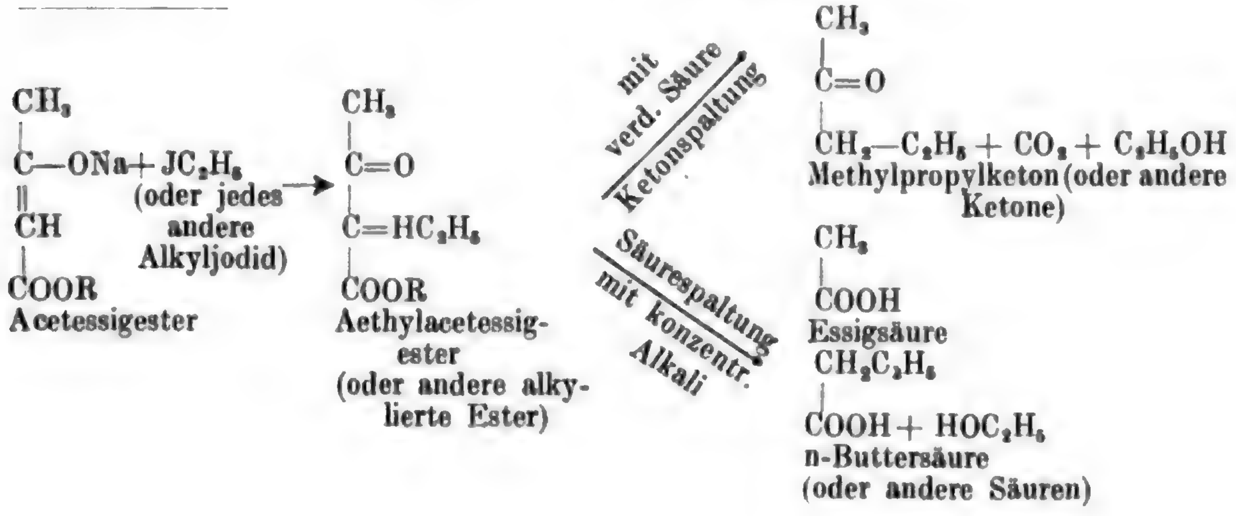




Es entsteht dann also aus einem Enol direkt das Derivat eines Ketons. Dieser Reaktionsverlauf ist für einige Reaktionen bewiesen. Dies hat deswegen Bedeutung, weil es zeigt, daß die früher allgemein übliche Bestimmung der Konstitution von Säuresalzen unbekannter Konstitution durch Alkylierung nicht zuverlässig ist, da ja bei der Alkylierung nicht immer echte Derivate des reagierenden Salzes, sondern eines isomeren Salzes auftreten können.

29e) Anwendung des Acetessigesters zu Synthesen. Die durch Alkylierung gewonnenen alkylierten Acetessigester können ebenso wie der freie Acetessigester durch verschiedene Reagentien der Ketonspaltung und der Säurespaltung unterliegen. Hierdurch ist der Aufbau einer großen Reihe von Säureestern, Ketonen und Säuren ermöglicht worden. Diese Synthese hat für den Ausbau der systematischen Chemie große Bedeutung gehabt.

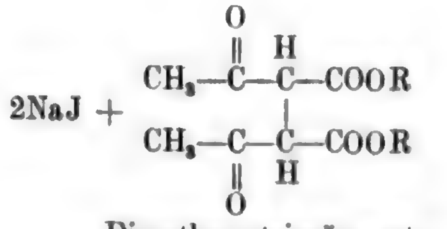
Beispiele:



29f) Kondensationsreaktionen des Acetessigesters. Acetessigester vermag sich mit zahlreichen Verbindungen zu kondensieren, häufig unter Ringschluß.

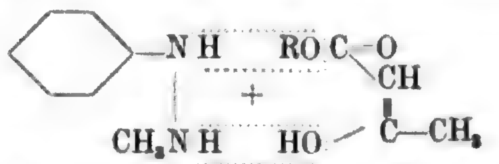
Beispiele:

$2[CH_3—CONa = CH—COOR] + J_2 =$

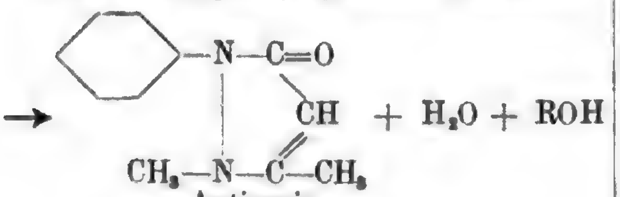


Diacetbernsteinsäureester

Digitized by Google



sym. Methylphenylhydrazin Enolform



Antipyrin

30. Ester der Blausäure. Von jeder der möglichen Formen der Blausäure leiten sich Ester ab.

$$\underset{\text{Blausäure}}{H—C\equiv N \text{ oder } H—N{=}C}$$

$$\underset{\text{Acetonitril}}{CH_3—C\equiv N} \qquad \underset{\text{Methylisonitril}}{CH_3—N{=}C}$$

Blausäuremethylester

Vgl. den Artikel „Cyanverbindungen".

31. Ester mehrbasischer Säuren. Zweibasische Säuren bilden saure Ester (Estersäuren) und neutrale Ester.

Saure Ester der Kohlensäure. Saure Ester sind nur als Salze bekannt.

Aethylkohlensaures Kalium

$$C{\lt}\begin{matrix}OK\\ O\\ OC_2H_5\end{matrix}$$

durch Einwirkung von CO_2 auf Kaliumäthylat in Alkohol. Perlmutterglänzende Blättchen.

Neutrale Ester der Kohlensäure. Sie entstehen aus Silbercarbonat und Jodalkyl. Aetherisch riechende Flüssigkeiten.
Kohlensäuredimethylester $(CH_3)_2CO_3$, Kp 91°.
Diäthylester, Kp 126°

Oxalsäuremethylester	$\begin{matrix}COOCH_3\\ \vert\\ COOCH_3\end{matrix}$	Fp 54°, Kp 153°.
Oxalsäureäthylester	$C_2O_4(C_2H_5)_2$	Kp 180°.
Malonsäureäthylester	$\begin{matrix}COOC_2H_5\\ \vert\\ CH_2\\ \vert\\ COOC_2H_5\end{matrix}$	Kp 198°.

Malonsäureester bildet ähnlich wie Acetessigester ein Natriumsalz, das sich alkylieren läßt. Die alkylierten Verbindungen lassen sich ähnlich wie alkylierte Acetessigester spalten. Er wird ebenso wie Acetessigester zu Synthesen verwandt.

Bernsteinsäureäthylester $C_2H_5O_2CCH_2CH_2$-$CO_2C_2H_5$, Kp 216°, kondensiert sich mit Natrium zu dem ringförmigen Succinylobernsteinsäureester.

Die Ester der Weinsäuren und Aepfelsäuren existieren in denselben stereoisomeren Formen wie die freien Säuren.

32. Ester von Orthosäuren. Durch Addition von Wasser an Ameisen- und Kohlensäure kann man sich Verbindungen entstanden denken, die man als Orthoameisensäure bezw. Orthokohlensäure bezeichnet.

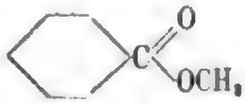
$$\underset{\text{Ameisensäure}}{H—C{\lt}\begin{matrix}O\\ OH\end{matrix} + \begin{matrix}H\\ OH\end{matrix}} \longrightarrow \underset{\text{Orthoameisensäure}}{H—C{\lt}\begin{matrix}OH\\ OH\\ OH\end{matrix}}$$

$$\underset{\text{Kohlensäure}}{C{\lt}\begin{matrix}OH\\ OH\\ O + H\\ OH\end{matrix}} \longrightarrow \underset{\text{Orthokohlensäure}}{C{\lt}\begin{matrix}OH\\ OH\\ OH\\ OH\end{matrix}}$$

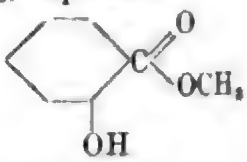
Die freien Säuren existieren nicht, wohl aber ihre Ester.
Orthoameisensäureäthylester $HCO_3(C_2H_5)_3$, Kp 146°, aus Chloroform und Natriumäthylat.
Orthokohlensäureäthylester $CO_4(C_2H_5)_4$, Kp 158°, aus Tetrachlorkohlenstoff und Natriumäthylat.

$$C{\lt}\begin{matrix}Cl\ \ Na\,OC_2H_5\\ Cl\ \ Na\,OC_2H_5\\ Cl\ \ Na\,OC_2H_5\\ Cl\ \ Na\,OC_2H_5\end{matrix} \longrightarrow C{\lt}\begin{matrix}OC_2H_5\\ OC_2H_5\\ OC_2H_5\\ OC_2H_5\end{matrix} + 4\,NaCl$$

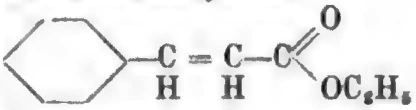
33. Ester aromatischer Säuren. Sie lassen sich nach den allgemeinen Bildungsweisen herstellen. Fast alle haben die Eigenschaft, die Endungen der sensiblen Nerven zu lähmen, d. h. ähnlich wie Cocain lokalanästhetisch zu wirken. Einige Ester kommen in der Natur vor; in zahlreichen Alkaloiden sind Estergruppen vorhanden.

Benzoesäuremethylester 

Kp 199°, als Niobeöl in der Parfümerie verwandt.
Aethylester $C_6H_5CO_2C_2H_5$, Kp 213°.

Salicylsäuremethylester 

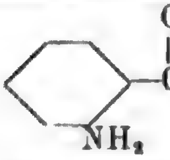
Kp 224°, Hauptbestandteil des Gaultheriaöls.
Zimmtsäureäthylester

 , Kp 271°.

Phenylessigsäureäthylester $C_6H_5CH_2COOC_2H_5$, Kp 226°, aus Benzylcyanid, Alkohol und Salzsäure.

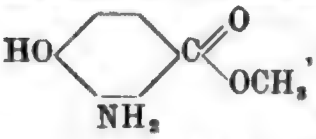
Benzoylessigsäuremethylester $C_6H_5COCH_2$-$COOCH_3$, Kp $152°_{15}$, aus Methylbenzoat und Methylacet durch Kondensation mit Natrium. Der Ester ist ein Gemenge von 83% Ketonform (obige Formel) und 17% Enolform. Letztere, β-Oxyzimmtsäuremethylester $C_6H_5C(OH) = CHCOOCH_3$, Fp ca. 35°, fällt aus der alkalischen Lösung des Benzoylessigesters beim Ansäuern kristallinisch aus. Vgl. oben Acetessigester.

Anthranilsäuremethylester,



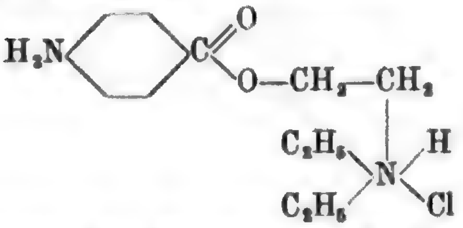
COC$_2$H$_5$, Fp 25,5°, Kp 125°, ist ein charakteristischer Bestandteil des Orangenblütenöls (Neroliöls).

m-Amido-p-oxybenzoesäuremethylester,



, wird unter dem Namen „Orthoform" als Lokalanästheticum verwandt.

p-Aminobenzoesäureester des Diäthylaminoäthanols ist als salzsaures Salz unter dem Namen „Novocain" das heute am meisten gebrauchte Lokalanästheticum

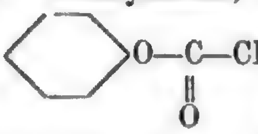


Cocain ist ein komplizierter Ester der Benzoesäure (Benzoylecgoninmethylester).

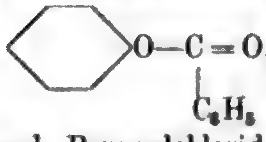
Atropin ist der Tropasäureester des Tropins (näheres siehe im Artikel „Alkaloide").

Chlorophyll ist ein Ester des Alkohols „Phytol" mit Säuren von unbekannter Konstitution (siehe den Artikel „Pflanzenstoffe unbekannter Konstitution").

34. **Ester aromatischer Alkohole und Phenole.** Phenylacetat, Acetylester des Phenols,



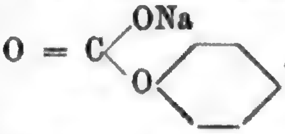
, Kp 195°, aus Natriumphenolatlösung und Essigsäureanhydrid. Phenylbenzoat,



, aus Natriumphenolat und Benzoylchlorid, Fp 71°; Kp 314°.

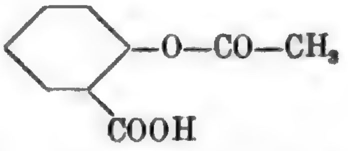
Salicylsäurephenylester, Phenylsalicylat, Salol, $HOC_6H_4COOC_6H_5$, Fp 43°, Kp 172° bei 12 mm, wird als Antisepticum verwandt.

Phenylkohlensaures Natrium, Natriumsalz des sauren Kohlensäurephenylesters



, aus CO_2 und Natriumphenolat, lagert sich beim Erhitzen unter Druck in salicylsaures Natrium um (siehe den Artikel „Phenole").

Acetylsalicylsäure, Essigsäureester der Salicylsäure, Kp 128°, ist als „Aspirin" offizinell



Durch Veresterung mehrerer Moleküle von p-oxy-Benzoesäure miteinander entstehen Ketten; derartige Ketten sind vermutlich in den Gerbstoffen (Tannin) vorhanden.

Literatur. ***Meyer und Jacobson,*** *Lehrbuch der organischen Chemie. Leipzig 1909.* — ***Richter-Anschütz-Schröter,*** *Organische Chemie. Bonn 1909.* — ***Beilstein,*** *Handbuch der organischen Chemie. Hamburg 1893—1906.*

III. Anhang. Wachs.

1. **Allgemeines.** Das Wachs der Bienen enthält als charakteristischen Bestandteil Ester von Fettsäuren mit höheren einwertigen Alkoholen. Da es nun eine große Anzahl von Naturprodukten gibt, die dem Bienenwachs physikalisch wie chemisch nahestehen, so bezeichnet man sie insgesamt als Wachse. Wachse im chemischen Sinne sind Stoffe tierischer oder pflanzlicher Herkunft, die als Hauptbestandteil Ester höherer Fettsäuren mit höheren einwertigen Alkoholen enthalten. Neben den Estern enthalten die Wachse meist noch andere Stoffe z. B. hochmolekulare freie Säuren und freie Alkohole, ferner höhere Kohlenwasserstoffe.

2. **Anwendung.** Wachse werden zur Fabrikation von Kerzen und Wachszündhölzern verwandt. Wachskerzen werden namentlich bei gottesdienstlichen Handlungen, besonders in katholischen und orthodoxen Kirchen (Rußland) verbrannt. Ferner dienen Wachse als Bohnermittel für Fußböden (hauptsächlich Carnaubawachs, siehe unten).

Digitized by Google

Export und Import nach Deutschland

	Einfuhr 1909		Ausfuhr 1909	
	dz	1000 M	dz	1000 M
Insekten- inkl. Bienenwachs, roh	18 298	4887	4 805	1446
Pflanzenwachs, roh	9 805	1830	255	44
Wachs raffiniert, Wachsstümpfe	4 455	586	14 048	3749

3. Verfälschungen und Surrogate. Wegen des hohen Preises der Wachse werden diese vielfach mit minderwertigem Material verfälscht, teils mit mineralischen Beschwerungsmitteln, teils mit anderen organischen Stoffen, z. B. Stearin, Fett, Paraffin. Besonders das bei Boryslaw in Galizien gefundene Erdwachs (Ozokerit, Ceresin), das aus paraffinähnlichen Kohlenwasserstoffen besteht und demnach chemisch gar nichts mit Wachs zu tun hat, wird, da es ähnlich durchscheinend und weich wie Wachs ist, vielfach an Stelle von echtem Wachs für Kerzenfabrikation verwendet und besonders nach Rußland exportiert.

4. Tierische Wachse. Walrat (Spermaceti) kristallisiert aus dem Walratöl aus, das sich im Schädel des Pottwales (Physeter makrocephalus) findet. Es besteht hauptsächlich aus Palmitinsäurecetylester $C_{15}H_{31}COO—C_{16}H_{33}$, Fp 53,5°.

Bienenwachs bildet die Wandungen der Bienenzellen. Es ist ein Gemenge von Cerotinsäure („Cerin") $C_{25}H_{51}COOH$, die löslich in heißem Alkohol ist und von Palmitinsäure-Myricylester („Myricin") $C_{15}H_{31}COO—C_{30}H_{61}$, in Alkohol unlöslich. Daneben enthält es noch Melissinsäure $C_{29}H_{59}COOH$ sowie höhere Alkohole und Kohlenwasserstoffe.

Chinesisches Insektenwachs wird von der Wachsschildlaus (Coccus ceriferus) auf einer Eschenart (Fraxinus chinensis) abgesondert. Es enthält hauptsächlich Cerotinsäure-Cerylester $C_{25}H_{51}COO—C_{26}H_{53}$.

Wollfett ist im chemischen Sinne ein Wachs, da es nicht Ester des Glycerins, sondern — neben sauren und anderen Nebenbestandteilen — Ester der einwertigen Alkohole Cholesterin und Isocholesterin mit Palmitin-, Cerotin- und anderen Säuren enthält. Es wird zur Bereitung von Salben als Lanolin sowie auch zu anderen Zwecken technisch verwendet (vgl. den Artikel „Fette, Oele, Seifen").

5. Pflanzenwachse. Carnaubawachs ist ein wichtiger Handelsartikel. Es überzieht die Blätter des Carnaubabaums, einer in Brasilien heimischen Palmenart (Copernicia cerifera).

Bestandteile: Myricylalkohol $C_{30}H_{61}OH$ und Cerotinsäure und andere höhere Ester und Säuren, teils frei, teils verestert, ferner Kohlenwasserstoffe.

Bananenwachs enthält einen Ester $C_{28}H_{57}COO—C_{13}H_{27}$.

Literatur. ***Meyer und Jacobson***, *Lehrbuch der organischen Chemie. Leipzig 1909.* — ***Ubbelohde***, *Handbuch der Oele und Fette. Leipzig 1908.*

K. H. Meyer.

Euler
Leonhard.

Geboren am 15. April 1707 in Basel, gestorben am 7. September 1783 in Petersburg. Er war der Sohn eines Landpfarrers, eines Schülers von Jakob Bernoulli, und wurde anfänglich von dem Vater unterrichtet, studierte darauf bei Johann Bernoulli Mathematik und folgte diesem 1727 nach Petersburg, wo er 1730 Professor der Physik an der Akademie wurde. 1741 ging er als Direktor der mathematischen Abteilung der Akademie der Wissenschaften nach Berlin und kehrte 1766 nach Petersburg zurück. Schon seit 1735 auf einem Auge blind, verlor er 1766 das Augenlicht völlig. Euler war ein genialer Kopf und einer der fruchtbarsten Schriftsteller, gegen 700 Abhandlungen hat er veröffentlicht, 200 sollen in seinem Nachlaß vorgefunden worden sein. Die Mathematik sieht in ihm einen der Begründer der analytischen Mechanik; sein Additionsgesetz der elliptischen Funktionen ist unter dem Namen des Eulerschen Theorems bekannt. Fast auf allen Gebieten der Physik hat Euler gearbeitet. Energisch bestritt er Newtons Hypothese der Fernwirkung und im besonderen seine Emissionstheorie des Lichts, der er eine Aethertheorie entgegenstellte, die Licht, Wärme, mechanische Kraft und Elektrizität auf eine gemeinsame Ursache, den Aether, zurückführte.

Literatur. ***N. Fuss***, *Eloge de Mr. L. Euler. Petersburg 1788. Deutsch Basel 1786.* — ***Rudio***, *L. Euler. Basel 1884.* — ***Derselbe***, *Die Baseler Mathematiker Daniel Bernoulli und Leonhard Euler. Basel 1884.*

E. Drude.

Eutropie

auch katamere Eutropie bezeichnet das gesetzmäßige Verhalten der Kristalle innerhalb einer Verwandtschaftsreihe des natürlichen Systems der Elemente und Verbindungen (z. B. P, As, Sb, Bi oder $CaCO_3$, $SrCO_3$, $BaCO_3$). Alle Eigenschaften ändern sich mit

Digitized by Google

steigendem Molekulargewicht entweder in auf- oder absteigender Reihe (vgl. den Artikel „Kristallchemie").

Exkretionsorgane.

1. Protonephridien: a) Als dauernde Exkretionsorgane. b) Als larvale Exkretionsorgane. 2. Die segmental angeordneten offenen Nephridien der Ringelwürmer: a) Der polychäten Anneliden. b) Der Oligochäten. c) Der Hirudineen. d) Der Echiuriden und Sipunculiden. e) Die Urnieren der Oligochäten und Hirudineen. 3. Die offenen Nephridien der Brachiopoden. 4. Die modifizierten Segmentalorgane der Gliedertiere: a) Schalen- und Antennendrüse der Crustaceen. b) Nephridium von Limulus. c) Coxaldrüsen der Arachnoiden. d) Nephridien von Peripatus. 5. Die Nieren der Mollusken. 6. Die Nieren der Wirbeltiere (Vorniere, Urniere, Nachniere). 7. Sonstige Nierenorgane von wechselnder morphologischer Bedeutung: a) Die Malpighischen Gefäße der Gliedertiere. b) Das Exkretionsorgan der Nematoden. c) Die Exkretionsorgane bei den Echinodermen. d) Die Nephrocyten der Gliedertiere. e) Die Exkretionsorgane bei den Tunicaten. f) Höhere Tierformen ohne besondere Exkretionsorgane.

Die Exkretionsorgane haben die Aufgabe, die aus dem tierischen Stoffwechsel sich ergebenden, für den Körper unbrauchbaren, ja schädlichen Abfallstoffe aus dem allgemeinen Säftekreislauf auszuschalten und aus dem Körper abzuleiten. Nur den niedersten Metazoenstämmen fehlen solche Exkretionsorgane völlig, also zunächst den Schwämmen und Cölenteraten, weiter den Mesozoen und endlich auch den acölen Turbellarien, wenn auch ihr Vorhandensein bei letzteren noch nicht völlig auszuschließen ist. Den übrigen höheren Metazoen kommt dagegen mit verschwindenden Ausnahmen, von denen am Schlusse noch zu reden sein wird, ein besonderes Exkretionsorgan zu.

1. Protonephridien. Unter Protonephridien sind Exkretionsorgane zu verstehen, deren mannigfach gestaltetes Kanalsystem durch besondere Poren an der Körperoberfläche nach außen mündet, gegen den inneren Leibesraum dagegen durch eigenartige cilientragende Terminalorgane völlig abgeschlossen erscheint.

1a) Protonephridien als dauernde Exkretionsorgane. Als solche ist ihr Vorkommen ein ganz allgemeines und konstantes bei Plattwürmern und Rädertieren, sie treten ferner noch auf bei polychäten Anneliden und finden sich endlich bei einer Reihe isolierter Tiergruppen (Gastrotrichen, Echinoderiden, Echinorhynchus, endoprokten Bryozoen) sowie bei Amphioxus.

Den morphologisch wichtigsten Bestandteil der Protonephridien bilden ihre Terminalorgane, die in typischer Ausbildung (Fig. 1) sich zusammensetzen aus einer Terminalzelle mit Kern, aus einem Binnenraum, der von stark verdünnten Membranen umschlossen wird und in seinem Inneren eine Wimperflamme aufweist, sowie endlich aus einer Kapillare, welche den Anschluß des Terminalorgans an das eigentliche protonephridiale Kanalsystem vermittelt. Alle diese Teile sind in der Regel nichts anderes als Differenzierungen einer einzigen Zelle,

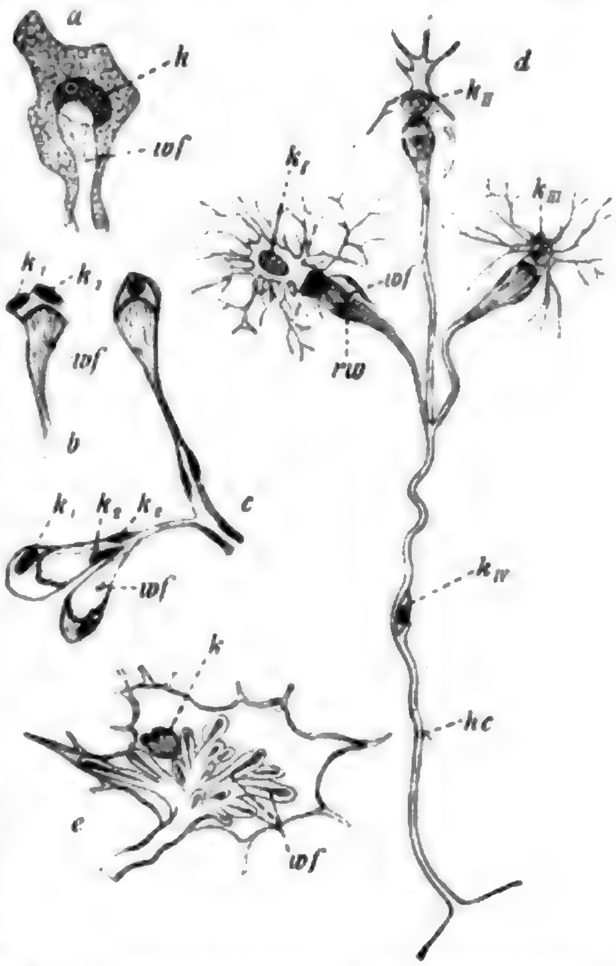


Fig. 1. Terminalorgane der Protonephridien verschiedener Plattwürmer. Aus J. Meisenheimer, Die Exkretionsorgane der wirbellosen Tiere, I. Ergebnisse und Fortschritte der Zoologie, 2. Bd., 1909. a von Tetracelis marmorosum. Nach Luther, 1904. b von Stichostemma graecense. Nach Böhmig, 1898. c von Geonemertes chalicophora. Nach Böhmig. 1898. d von Taenia crassicollis. Nach Bugge. 1902. e von Amphilina foliacea. Nach Hein. 1904. k, k_1, k_{I-III} Kerne der Terminalorgane, k_2, k_{IV} Kerne der Kapillaren, hc Sammelkapillare, rw Ringwulst am Binnenraum der Terminalorgane, wf Wimperflammen.

welche eben als Terminalzelle den inneren Abschluß herbeiführt. Auf dieser einfachen Entwickelungsstufe begegnen wir den Terminalorganen bei den Turbellarien und vielen Nemertinen; bei anderen treten mannigfache Komplikationen hinzu, so bei den Band-

Digitized by Google

würmern, wo die Terminalzellen sich gegen das Parenchym hin außerordentlich stark dendritisch verästeln (Fig. 1d), wo ferner die Wände des Binnenraums durch einen verdickten Ringwulst besonders gestützt erscheinen. Bei Rädertieren können ferner der Außenfläche der Terminalzellen lange Geißeln ansitzen, auch sind hier häufig die einzelnen Cilien der Wimperflamme zu einer einheitlichen undulierenden Membran verschmolzen. Am stärksten modifiziert sind die Terminalorgane bei den polychäten Anneliden, wo sie sich zu den sogenannten Solenocyten umgebildet haben. Diese Solenocyten (Fig. 2) sitzen in großer Zahl den blind geschlossenen Enden der Nephridialkanäle auf und bestehen je aus einem langen dünnen Röhrchen, welches mit seinem basalen Ende die Wandung des Nephridialkanals durchsetzt, an seinem apicalen, in die Coelomhöhle frei hineinragenden Ende dagegen eine den Kern enthaltende Zelle trägt. Diese letztere entspricht zweifellos einer Terminalzelle, so wie das Röhrchen dem Binnenraum und der Kapillare entspricht. Durchzogen wird das Röhrchen von einem der Wimperflamme homologen Gebilde, einer langen Geißel, welche von der Terminalzelle ihren

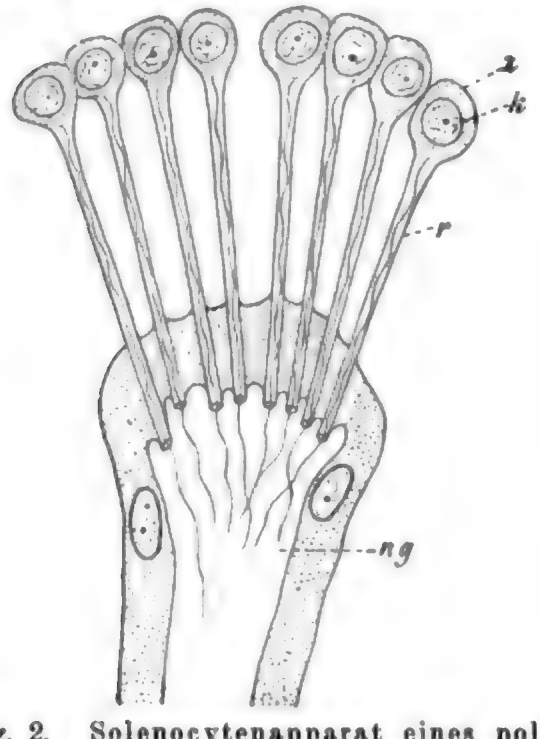


Fig. 2. Solenocytenapparat eines polychäten Ringelwurms (Phyllodoce paretti). Im Längsschnitt durch das Ende eines Nephridialastes. Aus J. Meisenheimer, l. c., Nach Goodrich, 1902. k Kern der Terminalzelle, ng Nierenkanal, r Solenocytenröhre, z Terminalzelle.

Ursprung nimmt und weit in das Lumen des Nephridialkanals hineinragt. Die Anordnung der Solenocyten ist eine sehr mannigfache. Zumeist stehen sie bündel- oder fächerförmig, dann aber auch zerstreut oder reihenweise gruppiert, je nach der besonderen Form des Nephridialkanals selbst (Fig. 3). Ganz ähnlich

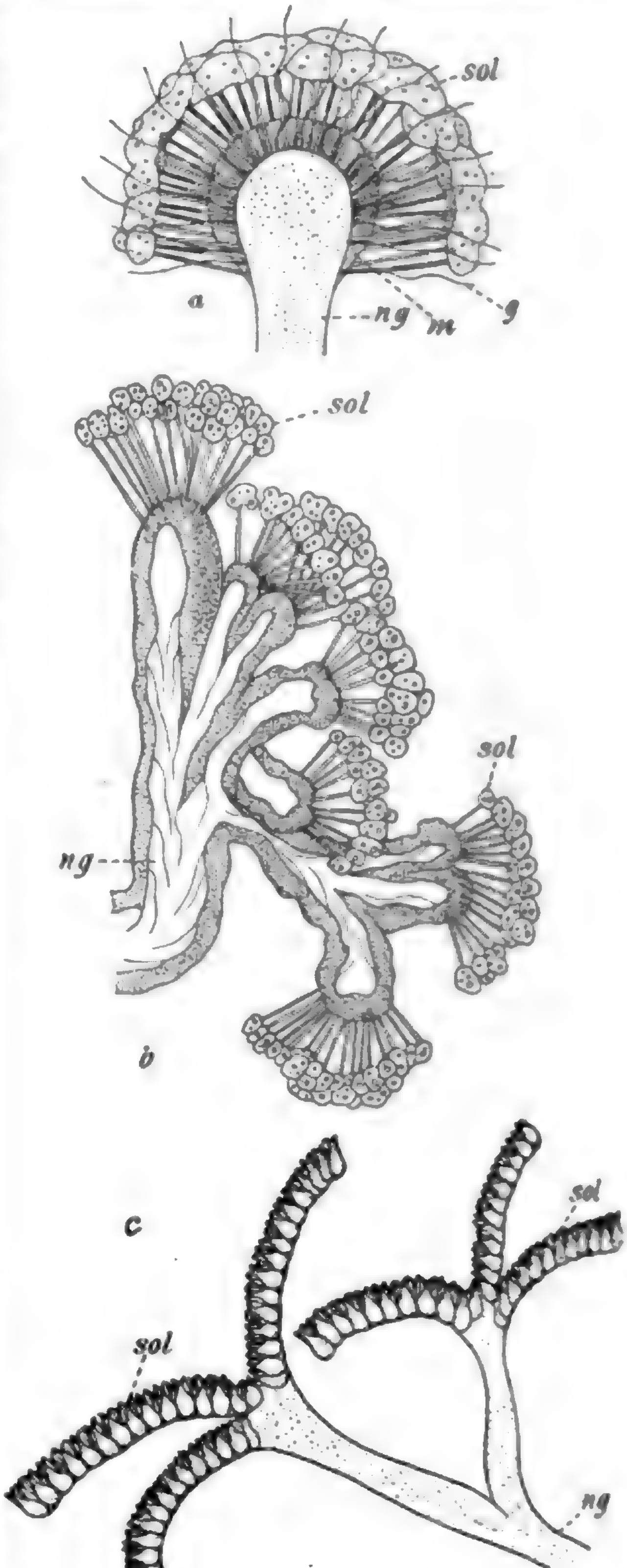


Fig. 3. Protonephridien einiger Polychäten in ihren Endabschnitten. Aus J. Meisenheimer, l. c. a von Eulalia viridis Nach Fage, 1906. b von Phyllodoce paretti. Nach Goodrich, 1900. c von Nephthys hombergii. Nach Fage, 1906. g äußere Geißeln am Ende der Nephridialkanäle, m stützende Membran der Solenocyten, ng Nephridialkanal, sol Solenocyten.

Digitized by Google

wie bei den Polychäten sind auch die Solenocyten des Amphioxus gebaut.

Die ausführenden **Leitungswege der Protonephridien** weisen bei weitem nicht die gleiche morphologische Einheitlichkeit auf, wie sie den Terminalorganen zukommt, da sie eben in viel höherem Maße von der so überaus verschieden gestalteten Gesamtorganisation des Körpers der genannten Tiergruppen beeinflußt werden müssen. Als Grundtypus liegt aber allen ein Paar symmetrisch zu beiden Seiten des Körpers angeordneter Kanäle zugrunde, welche die Kapillaren der Terminalorgane aufnehmen und durch je einen besonderen Porus an den Seiten des Körpers nach außen münden. Wir begegnen diesem Grundtypus noch bei den Larven der Distomeen (Fig. 4), wo zudem nur ein einziges Paar von Terminalorganen vorhanden ist. Getrennte zu beiden Seiten des Körpers liegende Exkretionsstämme treffen wir weiter bei den rhabdocölen Turbellarien an, doch können dieselben auch hier schon in ihrem Verlauf recht beträchtlich kompliziert werden. Bei den Trematoden (Fig. 5) sind zwar auch noch im einfachsten Falle zwei Längsstämme wohl zu unterscheiden, aber diese fließen hier stets schon aus einer größeren Zahl von Seitenästen zusammen und vereinigen sich am Hinterende des Wurmes zu einem unpaaren medianen Abschnitt, der seinerseits durch einen feinen Porus nach außen mündet. Sehr viel stärkere Umgestaltungen erfährt dieses einfache Kanalsystem dann aber weiter dadurch, daß die Zahl der Längsstämme sich vermehrt und zwischen ihnen eine vielfache Anastomosenbildung statthat, und daß der Endabschnitt sich zu einer Art Endblase von mannigfacher Form erweitert. — Auch das Nephridialsystem der Bandwürmer (Fig. 6) läßt sich von dem gleichen Grundtypus ableiten, auch hier ist ursprünglich jederseits ein besonderer Kanal vorhanden, der als feiner Gang im Hinterende des Körpers beginnt, dorsalwärts nach vorn bis zum Scolex verläuft, sich hier in einer Schlinge nach der Ventralseite wendet und nun unter beträchtlicher Erweiterung seines Durchmessers als Hauptstamm wieder nach hinten bis zur Endspitze des Körpers zieht, wo er von der gemeinsamen Endblase aufgenommen wird. Aber dieser Grundtypus erleidet auch hier überaus mannigfache Modifikationen. So werden zunächst, um nur einige der wichtigeren anzuführen, die Längs-

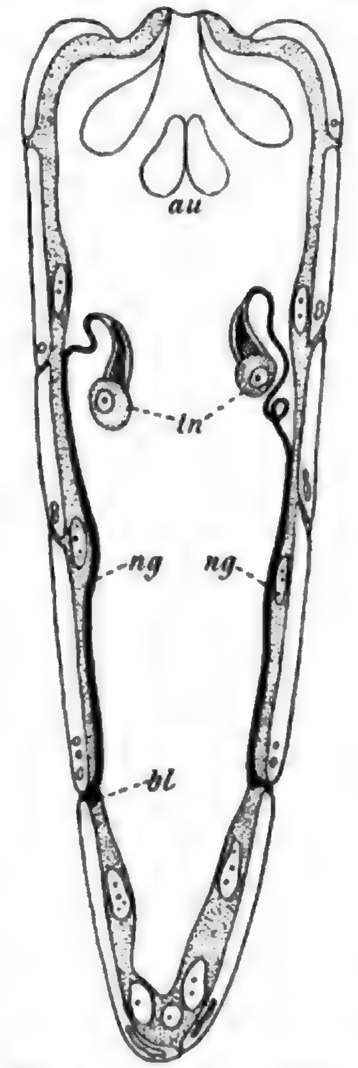


Fig. 4. Larve von Distomum hepaticum mit eingetragenen Exkretionsstämmen. Aus J. Meisenheimer, l. c. Nach Coe, 1896. au Auge, bl Endblase, ng Exkretionsstamm, tn Terminalorgane.

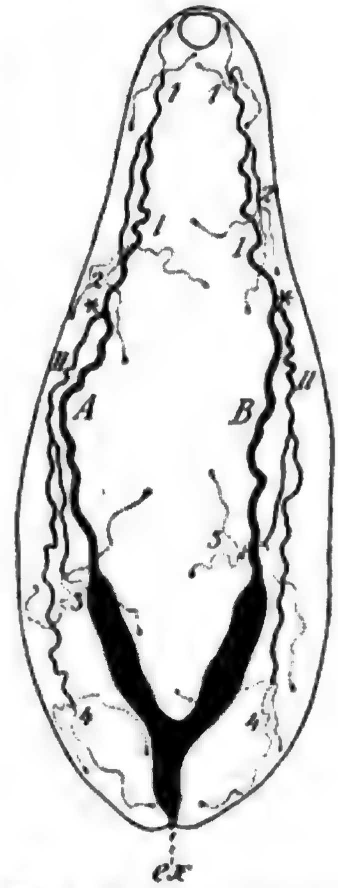


Fig. 5. Exkretionsorgan eines Trematoden (Distomum heterophyes). Aus J. Meisenheimer, l. c. Nach Looss, 1894. A, B die beiden Hauptstämme, I, II Gefäße 2. Ordnung, 1—4 die beiderseitigen vier Gruppen von je 3 Terminalorganen, ex Exkretionsporus.

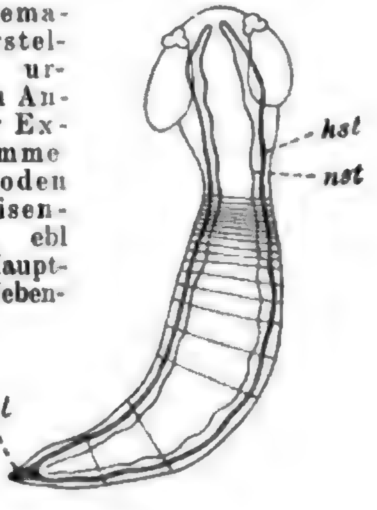


Fig. 6. Schematische Darstellung der ursprünglichen Anordnung der Exkretionsstämme bei den Cestoden Aus J. Meisenheimer, l. c. ebl Endblase, hst Hauptstamm, nst Nebenstamm.

Digitized by Google

stämme beider Seiten durch Querkommissuren verbunden, es können ferner an den verschiedensten Stellen Schlingen- und Inselbildungen auftreten, es geht die Endblase nach dem Abstoßen der Endproglottis verloren. Es münden dann an der jeweilig letzten Proglottis die vier Längsstämme direkt nach außen, es treten aber weiter in ihrem Verlauf bis zum Scolex besondere Randporen (sogenannte Foramina secundaria) auf, welche gleichfalls die Ableitung der Exkretflüssigkeit besorgen.

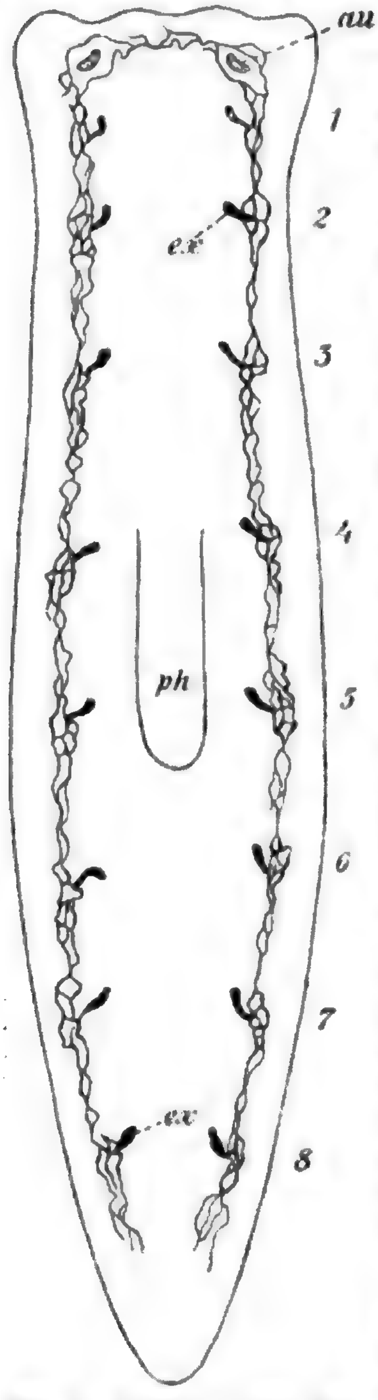


Fig. 7. Schema des Exkretionssystems von Dendrocoelum lacteum. Aus J. Meisenheimer, l. c. Nach Wilhelmi, 1906. au Auge, ex Exkretionsporen, ph Pharynx.

Eine Vermehrung der Zahl der Exkretionsstämme, wie sie vereinzelt schon bei niederen Turbellarien nachzuweisen ist, ist dann das charakteristische Kennzeichen der höheren, der tricladen Turbellarien. Es treten hier jederseits vier Hauptstämme auf, die weiter noch die besondere Eigentümlichkeit aufweisen, daß eine größere Zahl von Exkretionsporen in ihren Verlauf eingeschaltet ist, wogegen die ursprüngliche Mündungsstelle verloren ging. Sehr klar zeigen dieses Verhalten unsere Süßwassertricladen, bei denen im übrigen bei einzelnen Formen wieder eine sekundäre Reduktion in der Zahl der Längsstämme eintrat. So ist es beispielsweise auch bei Dendrocoelum lacteum (Fig. 7), wo im übrigen die Längskanäle in regelmäßigen Abständen netzartig verflochtene Knäuel bilden, denen je ein Exkretionsporus zukommt. Es bietet sich in diesem Exkretionssystem die Vorstufe eines segmental gegliederten Organes dar, es brauchten nur die Verbindungen zwischen den einzelnen, je aus einem Knäuel und Porus bestehenden Abschnitten gelöst zu werden und wir hätten eine Reihe segmentartig hintereinander gelegener, gleichgebauter Organe vor uns. Dieser weiteren Stufe begegnen wir bei den Nemertinen. Hier wird bei manchen Formen, wie bei Stichostemma graecense, das Nephridialsystem jederseits durch ein System vielfach verschlungener und anastomosierender Kanäle gebildet, die den Körper der ganzen Länge nach durchziehen und durch eine größere Anzahl von Seitenporen nach außen ausmünden. Indem dann zwischen den einzelnen Knäuelpartien mit ihren zugehörigen Poren eine Kontinuitätstrennung einsetzt, wird das ganze System in eine Anzahl aufeinander folgender selbständiger Nephridien zerlegt. Im übrigen weist das Protonephridialsystem der Nemertinen zumeist hochgradige Spezialisierungen auf. Von ihnen ist wohl die wichtigste die, daß sich die Terminalorgane nicht mehr über den ganzen Körper zerstreut finden, sondern daß sie eine Lokalisierung erfahren und mit den Blutbahnen in innige Beziehung treten, sei es daß sie sich in die Gefäßwand derselben einstülpen oder daß sie sich mit vielfach verästelten Gefäßkomplexen eng verflechten.

Außerordentlich viel enger schließen sich in dem Verhalten ihrer exkretorischen Leitungswege an die ursprünglichen Plattwürmer wieder die Rädertiere an (Fig. 8). Auch hier findet sich zu beiden Seiten des Körpers je ein Längsgefäß, das nach innen hin die Terminalorgane aufnimmt, mit seinem äußeren Ende dagegen unter Vermittelung einer unpaaren Exkretionsblase auf der Körperoberfläche ausmündet. Die Leitungswege zerfallen scharf in zwei Abschnitte, in die eigentlichen Längsstämme, die gelegentlich in ihrem Verlaufe einzelne Treibwimpern enthalten, und in ein besonderes Kapillarsystem, das sich zwischen jene und die Terminalorgane einschaltet und in der Regel aus einem vorderen System für das Räderorgan und einem hinteren für den Körper besteht.

Erwähnt sei ferner an dieser Stelle das Exkretionssystem der endoprokten Bryozoen, welches typisch protonephridialen Bau besitzt und aus zwei einfachen, symmetrisch zu beiden Seiten des Körpers angeordneten Kanälchen besteht, die nach innen je ein Terminalorgan tragen und nach außen in

Digitized by Google

einem gemeinsamen kurzen Ausführgang zusammenstoßen.

Im vollen Gegensatz zu den bisher besprochenen Verhältnissen steht die Anordnung der protonephridialen Leitungswege bei den segmentierten Polychäten, wo sie fast völlig den Charakter typischer Segmentalorgane angenommen haben, also vor allem paarweise in jedem Segment sich finden. Jedes Protonephridium stellt einen einfachen

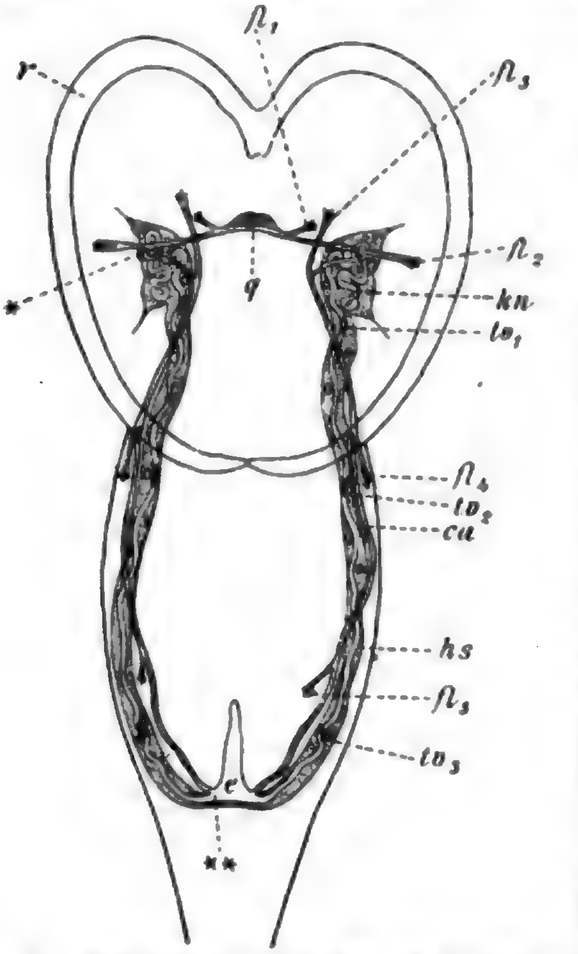


Fig. 8. Flächenansicht des Exkretionsorgans eines Rädertieres, Lacinularia socialis. Aus J. Meisenheimer, l. c. Nach Hlava, 1904. ca Kapillarröhre, e unpaares Endstück, fl Terminalorgane, hs Hauptexkretionsstamm, kn Knäuelbildung desselben, q Querkommissur zwischen den beiderseitigen Kanalsystemen, r Räderorgan, tv Treibwimpern.

langgestreckten, in der Cölomhöhle gelegenen Schlauch dar, der von Flimmerepithel ausgekleidet erscheint, nach außen durch einen Porus an der Körperoberfläche ausmündet, mit seinem inneren blindgeschlossenen Ende dagegen frei in die Cölomhöhle hineinragt und hier die Solenocyten trägt.

Bei Amphioxus endlich liegen die Nierenkanälchen im Bereiche des ganzen Kiemendarmes als paarige segmental angeordnete und bogenförmig gekrümmte Röhrchen, die nach der einen Seite in den Peribranchialraum ausmünden, mit ihrem inneren Ende dagegen dem Cölom sich zuwenden und hier mit Solenocyten besetzt sind.

1b) Protonephridien als larvale Exkretionsorgane. Wie aus unserer bisherigen Betrachtung hervorgeht, besitzen die Protonephridien ihre Hauptverbreitung bei niederen Würmern und Rädertieren. Bei höheren Tieren spielen sie dagegen eine nicht unbedeutende Rolle nur noch als larvale Exkretionsorgane, die vergänglicher Natur sind und sich in der Regel durch einen sehr einfachen Bau auszeichnen. Sie treten als solche auf bei den polychäten Anneliden, bei Echiurus, bei den Phoroniden sowie bei Muscheln und Schnecken und werden in der Regel als Urnieren bezeichnet.

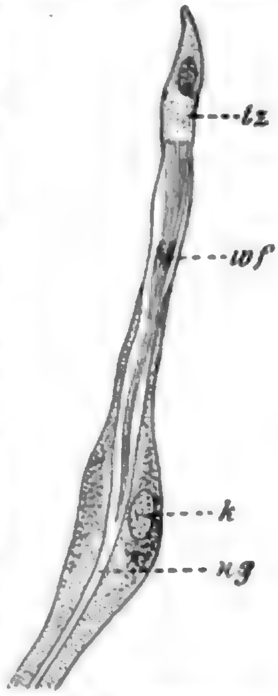


Fig. 9. Längsschnitt durch das larvale Protonephridium einer Muschel, Dreissensia polymorpha. Aus J. Meisenheimer, l. c. Nach Meisenheimer, 1900. k Kern des Urnierenkanals (ng), tz Terminalzelle, wf Wimperflamme.

In den einfachsten Fällen, wie sie beispielsweise die Trochophoralarven von Polychaeten und Muscheln (Fig. 9) darbieten, besteht das Protonephridium aus einem einfachen Kanälchen, dessen Wand aus einer einzigen Zelle gebildet wird, während eine zweite Zelle das Terminalorgan mit einer mächtig entwickelten Wimperflamme darstellt. Weiterhin können sich jedoch sehr beträchtliche Komplikationen einstellen. Auf späteren Trochophorastadien der Polychäten treten an dem einfachen Urnierenschlauch Verästelungen auf und es entwickelt sich an deren Enden ein komplizierter Solenocytenapparat. Ganz ähnlich verhalten sich in letzterer Hinsicht die Urnieren der Actinotrochalarve der Phoroniden. Nach einer anderen Richtung hin haben sich die Urnieren der Lungenschnecken weiter entwickelt. Bei den Süßwasserpulmonaten (Fig. 10) besteht das zu beiden Seiten des Larvenkörpers gelegene Organ aus zwei in einem Winkel zueinander gestellten und von einem feinen Kanal durchbohrten Schenkeln. Den Aufbau besorgen insgesamt vier Zellen: eine erste bildet den äußeren Ausführgang, die zweite füllt als Riesenzelle mit sehr großem Kern den Raum zwischen den beiden Schenkeln aus, die dritte bildet den inneren

Digitized by Google

Schenkel und die vierte endlich schließt als Terminalzelle das ganze Organ gegen die Leibeshöhle ab. Die fächerartig gestaltete Terminalzelle weist an ihrem peripheren Rande eine große Endvakuole auf, die von zahlreichen Exkretkörnchen erfüllt ist, und sendet in das Kanallumen hinein eine mächtige Wimperflamme. Etwas andersartig stellt sich der Bau der Urniere bei den Landpulmonaten dar, hier handelt es sich um lange, vielzellige Röhren, die an ihrem inneren Ende durch eine größere Zahl von Wimperzellen gegen die Leibeshöhle abgeschlossen werden. Entwickelungsgeschichtlich sind die larvalen Protonephridien in der Mehrzahl der Fälle auf rein ektodermale Anlagen zurückgeführt worden.

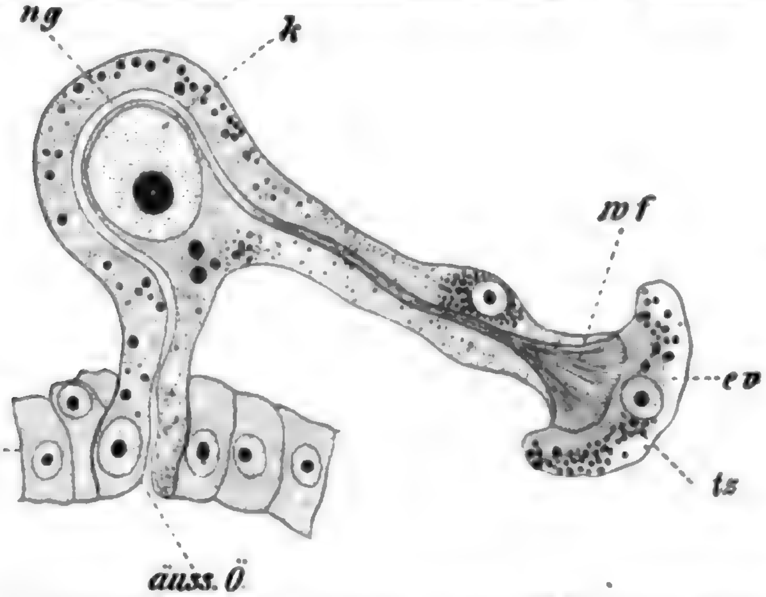


Fig. 10. Seitenansicht der Urniere eines Süßwasserpulmonaten. Aus J. Meisenheimer, l. c. Nach Meisenheimer, 1899. äuß. Ö. äußere Oeffnung, ect Ectoderm, ev Endvakuole der Terminalzelle, k Kern der Riesenzelle, ng Exkretionskanal, tz Terminalzelle, wf Wimperflamme.

2. Die segmental angeordneten offenen Nephridien der Ringelwürmer. Dem bisher betrachteten geschlossenen Nephridialtypus steht ein zweiter in den gegen die Leibeshöhle offenen Nephridien gegenüber. Derselbe hat seine typischste Ausbildung bei den Ringelwürmern gefunden, hat sich aber in mannigfach modifizierter Weise auch noch bei zahlreichen höheren Tierformen, die jenen den Ursprung verdanken, erhalten.

2a) Die offenen Nephridien der polychäten Anneliden. Dieselben sind weit allgemeiner verbreitet als die protonephridialen Segmentalorgane, wie letztere treten sie in regelmäßiger Aufeinanderfolge paarweise in jedem Segment auf. Den normalen Aufbau eines solchen Nephridiums möge dasjenige von Scalibregma inflatum als herausgegriffenes Beispiel veranschaulichen (Fig. 11). Der Gesamtumriß wird gegeben durch eine U-förmig gebogene Schlinge, deren Schenkel dicht aneinander liegen und innen durchaus bewimpert sind. Der innere Schenkel ist etwas breiter, er trägt an seinem an dem Dissepiment befestigten Ende auf einem verengten Halse eine trichterförmig sich erweiternde Oeffnung, das sogenannte Nephrostom, dessen Lippen mit Cilien besetzt sind. Der äußere Schenkel weist ein engeres Lumen auf, sein Ende zeigt eine rechtwinklige Abknickung, die zum Ausführgang wird und durch einen Porus nach außen mündet. Derart gestaltete Nephridien sind von zahlreichen Polychäten beschrieben worden, ihr Bau kann sich im einzelnen aber dadurch beträchtlich mehr komplizieren, daß entweder der Nierenkanal sich in mannigfache Windungen legt und Erweiterungen zeigt, oder aber dadurch, daß das Nephrostom sich höher differenziert und mächtige, mit Cilien besetzte Lippen ausbildet.

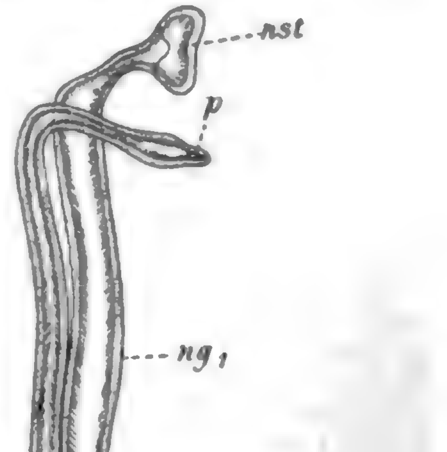


Fig. 11. Offenes Nephridium eines polychäten Anneliden, Scalibregma inflatum. Aus J. Meisenheimer, l. c. Nach Ashworth, 1902. $ng_{1,2}$ Nephridialkanäle, nst Nephrostom, p äußere Mündung.

Die Segmentalorgane der Polychäten erfahren aber nun noch eine weitere Komplikation dadurch, daß mit ihnen sich ein Organ

Digitized by Google

verbinden kann, welches ursprünglich in keinerlei Beziehung zu dem exkretorischen Apparat steht. Es ist dies der Genitaltrichter, der eine besondere segmentale Differenzierung des Cölomepithels darstellt und wohl ursprünglich die Aufgabe hatte, die Geschlechtsprodukte durch eine innere Trichteröffnung aufzunehmen und durch einen an der äußeren Körperwand gelegenen Porus nach außen zu entleeren. Dieses Verhalten findet sich tatsächlich noch bei manchen Capitelliden, bei den weitaus meisten Polychäten dagegen gewinnt der Genitaltrichter Beziehungen zu den Nephridien, und zwar zu solchen von offenem, wie von geschlossenem (protonephridialem) Typus. Im letzteren Fall stellt der Trichter ein mächtiges sackförmiges Organ dar, welches an seinem inneren Ende eine große, mit Cilien

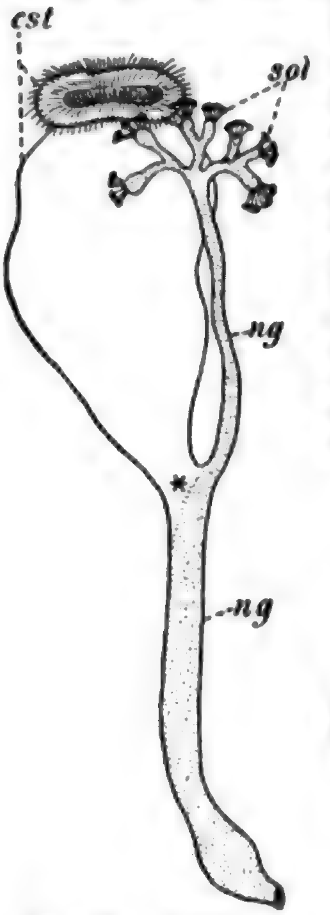


Fig. 12. Protonephridium eines polychäten Anneliden (Alciopa) mit verschmolzenem Genitaltrichter. Aus J. Meisenheimer, l. c. Nach Goodrich, 1900. cst Genitaltrichter, ng Nephridialkanal, sol Solenocyten. Bei * Vereinigung von Genitaltrichter und Nephridialkanal.

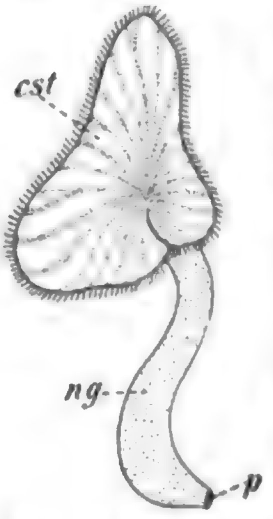


Fig. 13. Nephromixium eines polychäten Anneliden (Irma latifrons). Aus J. Meisenheimer, l. c. Nach Goodrich, 1900. cst Genitaltrichter, ng Nierenkanal, p äußere Mündung.

besetzte Oeffnung aufweist, an seinem entgegengesetzten Ende dagegen mit der Mitte des Nephridialschlauches in direkte Verbindung tritt (Fig. 12). Letzterer bleibt in seinem proximalen, die Solenocyten tragenden Abschnitt rein exkretorisch tätig, mit seinem äußeren distalen Teil aber übernimmt er nun neben der Entleerung der Exkretstoffe zugleich noch die Abfuhr der männlichen und weiblichen Geschlechtsprodukte, die von der Oeffnung des Genitaltrichters aus der Leibeshöhle aufgenommen werden.

Noch eingreifender sind die Veränderungen, welche die offenen Nephridien durch die Verbindung mit dem Genitaltrichter erleiden. Hier erfolgt die Vereinigung stets unmittelbar am Nephrostom, wobei sich dann der Genitaltrichter zunächst noch ziemlich unabhängig vom Nephrostom halten kann, in der Mehrzahl der Fälle aber fest mit dessen Rändern verschmilzt (Fig. 13). Das scheinbar einheitliche Segmentalorgan ist also dann in Wirklichkeit aus zwei ganz verschiedenen Komplexen zusammengesetzt, es stellt ein sogenanntes Nephromixium dar. Der sekundär aufgesetzte Genitaltrichter ist in der Regel durch seine mächtigen Lippen, seinen komplizierteren histologischen Aufbau, seine stärkere Bewimperung leicht von dem einfacher strukturierten und engeren Nephrostom eines nicht zusammengesetzten Nephridiums zu unterscheiden. Jedes Nephromixium besitzt eine doppelte physiologische Funktion, es ist einerseits exkretorisch tätig und leitet andererseits die Geschlechtsprodukte aus der inneren Leibeshöhle nach außen.

Eigenartige Umwandlungen kann der Genitaltrichter dann erleiden, wenn er nach Verlust der ursprünglichen äußeren Oeffnung keinen direkten Anschluß an ein Nephridium gewinnt. Er wird dann zu einem sogenannten ciliophagocytären Organ, welches, bald schalen-, bald sackförmig, feste Bestandteile der Cölomflüssigkeit, vor allem die mit Exkretstoffen beladenen leukocytenartigen Elemente aufnimmt und in sich bis zum völligen Zerfall derselben anhäuft. Meist liegen diese ciliophagocytären Organe dann einem protonephridialen Segmentalorgan dicht an und letzteres nimmt durch seine Wand hindurch die verflüssigten Exkretstoffe des ciliophagocytären Organs in sich auf. In diesen Fällen hat also nun der Genitaltrichter seine ursprüngliche Funktion aufgegeben und ist zu einem rein exkretorisch tätigen Organ geworden.

2b) Die offenen Nephridien der Oligochäten. Als Ausgangspunkt derselben muß ein einfaches Nephridium gelten, bei welchem ein Nephrostom aus der Leibeshöhle in einen gewundenen Kanal überführt, der seinerseits nach kürzerem oder längerem Verlauf durch einen Porus sich nach außen öffnet. Hieraus haben sich dann durch hochgradige Differenzierungen von Nephrostom und Leitungswegen die komplizierten Nephridien der Regenwürmer entwickelt. Das Nephridium von Lumbricus (Fig. 14) stellt sich in Form von drei Schleifen

Digitized by Google

dar, die völlig von eigenartig modifizierten, blasigen und gleichfalls exkretorisch tätigen Peritonealzellen umhüllt werden. Losgelöst von den drei Schleifen erscheint einzig der Trichterabschnitt, der als präseptaler Abschnitt vor dem vorhergehenden Dissepiment gelegen ist. Er stellt im wesentlichen das aus zahlreichen bewimperten Zellen zusammengesetzte Nephrostom dar, dessen obere Lippe hufeisenförmig gestaltet ist. Das Nephrostom führt über in den Nierenkanal, der das Dissepiment durchsetzt und dann einen sehr komplizierten Weg beschreibt. Er durchzieht zunächst den ersten Schenkel von Schleife I, weiter in rückläufiger Bewegung auch den zweiten Schenkel der gleichen Schleife, tritt in Schleife II über und bildet hier eine lange bis fast zur Spitze der Schleife II reichende Schlinge, kehrt wieder zurück in Schleife I und durchläuft deren Schenkel in umgekehrter Richtung unter starker Schlängelung zum zweiten Male. Dieser Abschnitt des Nierenkanals möge als Schleifenkanal bezeichnet werden, seine Wände sind dünn und zart und zumeist ohne Cilien. Unter Erweiterung seines Lumens geht der Schleifenkanal über in den Wimperkanal, der in gerader Richtung die Schleife II von ihrer Basis bis zur Spitze durchzieht. Seine Wandung besteht aus stärker entwickelten, von hellbräunlichen Körnchen erfüllten Zellen, sein inneres Lumen ist dicht von Cilien ausgekleidet. An der Spitze der Schleife II erweitert sich der Wimperkanal zu einer von kleinen bakterienartigen Stäbchen auf der Innenseite besetzten Ampulle, von dieser geht ein weiter, von Drüsenzellen ausgekleideter Drüsenkanal ab, der unter allmählicher Verengung die Schleife zurückläuft, die beiden Schenkel der Schleife I durchzieht und endlich in die Basis aller drei Schleifen, welche von dem peritonealen Aufhängeband des ganzen Organs gebildet wird, eintritt. Von hier gelangt er in Schleife III und wird nun als Stäbchenkanal bezeichnet, da hier in die Basis seiner Wandzellen zahlreiche körnige Filamente eingelagert sind. Der Stäbchenkanal mündet dann endlich in die Endblase ein, deren Epithel von einem Belage gitterartig sich durchkreuzender Muskelfasern umhüllt wird und die schließlich in einer kleinen Einsenkung der Epidermis nach außen mündet.

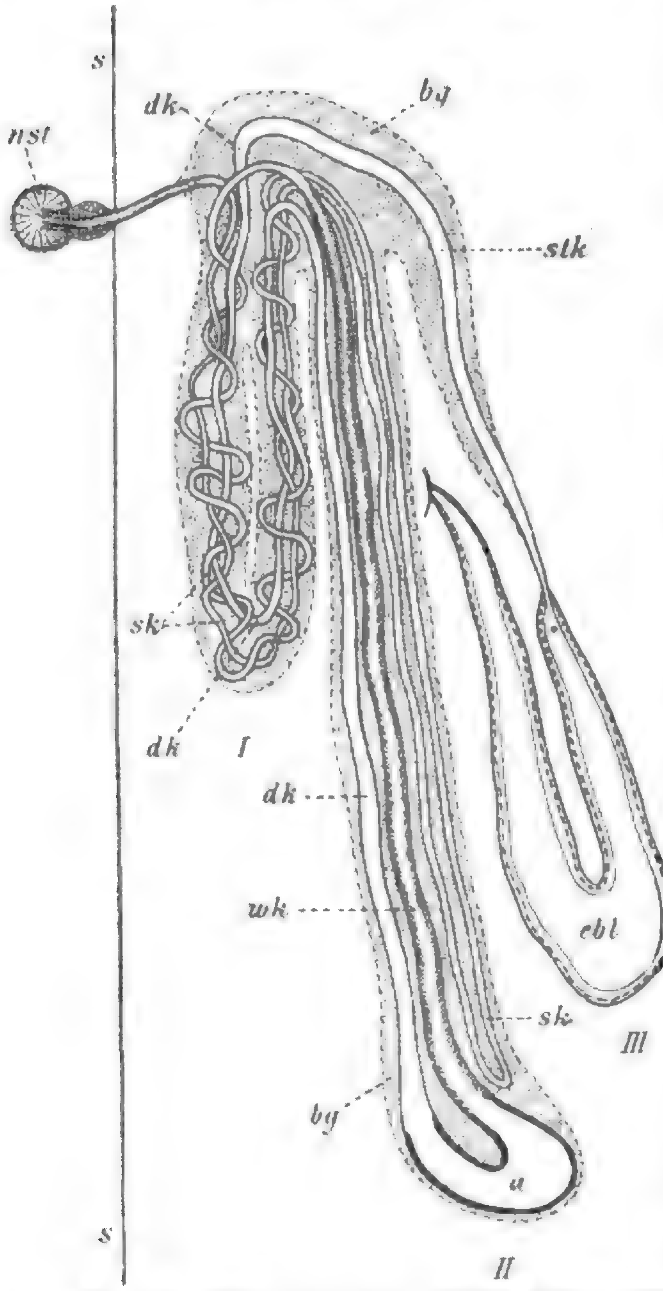


Fig. 14. Schematische Darstellung des Nephridiums eines Regenwurms. Aus J. Meisenheimer, l. c. Nach Maziarski, 1905. I—III die drei Hauptschleifen, a Ampulle, bg Peritonealhülle, dk Drüsenkanal, ebl Endblase, nst Nephrostom, s Dissepiment, sk Schleifenkanal, stk Stäbchenkanal, wk Wimperkanal.

Die meisten Regenwürmer besitzen ähnlich gebaute Nephridien. Von den besonderen Modifikationen möge nur die erwähnt werden, bei der es in jedem Segment an Stelle eines einzigen Nephridienpaares zur Ausbildung sehr zahlreicher, aber bedeutend kleinerer Nephridien, sogenannter Mikronephridien, kommt. Solche treten namentlich bei den großen Regenwürmern der Tropen auf, sie leiten sich aus dem Zerfall einheitlicher Anlagen ab, von denen in jedem Segment ursprünglich nur ein einziges Paar vorhanden ist. Erwähnt sei endlich noch, daß auch das Nephridium der Branchiobdelliden in seinem Aufbau sich durchaus auf das Oligochätennephridium zurückführen läßt, so daß diese Wurmfamilie wohl den Oligochäten näher steht als den Hirudineen, mit denen man sie früher vielfach vereinigte.

2c) Die Nephridien der Hirudineen. Einen durchaus eigenartigen Bau besitzen die segmental angeordneten Nephridien der Hirudineen. Der eigentliche Drüsenabschnitt zeigt mehrfache Schlingenbildung und wird in seinem ganzen Verlaufe durchzogen von

Digitized by Google

einem intrazellulären Kanal. Nach außen führt er gewöhnlich durch eine geräumige Endblase, an seinem inneren Ende ist er blind geschlossen. Im Bereiche dieses Endes sind die Drüsenzellen häufig zu mächtiger Größe angeschwollen, und es zeigt sich ferner der Exkretionskanal vielfach verästelt oder netzartig aufgelöst. An das blindgeschlossene Ende schließt sich dann weiterhin in vielen Fällen noch ein besonderes trichterförmiges Wimperorgan an. Um für dessen Beschreibung ein besonderes Beispiel herauszugreifen, so läßt dasselbe bei Clepsine bioculata (Fig. 15)

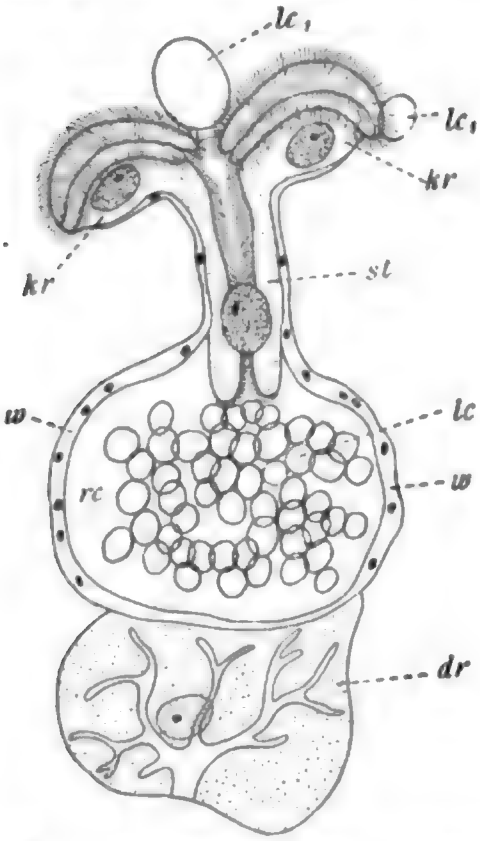


Fig. 15. Wimperorgan eines Blutegels (Clepsine bioculata). Aus J. Meisenheimer, l. c. Nach Graf, 1899. dr Endzelle des drüsigen Exkretionskanals, kr Kronenzellen, lc Leukocyten, rc Kapsel, w Wand derselben, st Stielzelle.

eine bewimperte Trichterkrone von einer blasig aufgetriebenen Kapsel unterscheiden, die beide durch einen Stiel miteinander verbunden sind. Die Trichterkrone wird aus zwei, am äußeren Rande etwas umgeschlagenen Zellen gebildet, welche auf ihrer Oberfläche schaufelförmig ausgehöhlt und stark bewimpert erscheinen. Sie führen über in einen gleichfalls bewimperten intrazellulären Kanal, der von einer einzigen Zelle gebildet wird und weit in die blasige Kapsel mit seinen Enden vorspringt. Die Wand der Kapsel selbst besteht aus einer dünnen Endothelhülle, sie legt sich dicht dem blindgeschlossenen Ende des Drüsenkanals an, ohne daß es jemals zu einer Kommunikation der beiderseitigen Innenräume käme. — Der Bau dieser Wimperorgane kann im einzelnen wohl variieren, prinzipiell aber ist er stets der gleiche, wie ihre Krone sich auch stets in Abschnitte der sekundären Leibeshöhle öffnet. Von hier nehmen sie mit der Trichteröffnung die mit Exkretstoffen beladenen lymphoiden Blutkörperchen auf, lagern sie in der Kapsel ab und führen ihren Zerfall herbei bis zur vollkommenen flüssigen Auflösung. Und diese Exkretflüssigkeit wird dann auf osmotischem Wege von den Wänden des drüsigen Exkretionskanals aufgenommen. Bei einzelnen Formen, wie beispielsweise bei Hirudiniden, können übrigens diese Wimperorgane ihre exkretorische Funktion völlig aufgeben und zu Bildungsstätten von Blutkörperchen werden. Die Exkretstoffe werden dann den Nephridien durch besondere Gefäße zugeführt. Ihrem morphologischen Wert nach sind die Wimperorgane nicht als Nephrostome aufzufassen, sie sind vielmehr morphologisch gleich zu setzen den umgewandelten Genitaltrichtern der Polychäten, stellen also ciliophagocytäre Organe dar.

2d) Die Exkretionsorgane der Echiuriden und Sipunculiden. Bei den Echiuriden hat eine starke Reduktion in der Zahl der Nephridien stattgefunden, was übrigens auch schon bei manchen Polychäten der Fall ist. Im übrigen bilden sie blasenförmige Organe, die durch einen kleinen Porus nach außen münden und in die Leibeshöhle sich mit einem kompliziert gebauten Trichter öffnen. Sie dienen zugleich als Ausführgänge der Geschlechtsprodukte, stellen also wohl Nephromixia dar.

Aehnlich liegen die Verhältnisse bei den Sipunculiden, wo indessen die Reduktion noch weiter auf ein Paar von Nephridien oder gar auf ein einziges unpaares Nephridium fortgeschritten ist. Bei ihnen treten aber ferner wiederum Homologa der ciliophagocytären Organe in den sogenannten Urnen auf, stark bewimperten Gebilden, die teils frei in der Leibeshöhle umherschwärmen, teils auf einer Unterlage, wie beispielsweise auf Gefäßwandungen fixiert sind.

2e) Die Urnieren der Oligochäten und Hirudineen. Dieselben zeigen keinerlei primitive Merkmale mehr, stellen sich vielmehr in jeglicher Hinsicht als frühzeitig differenzierte Teile des Nephridialapparates der erwachsenen Würmer dar. Demgemäß bestehen sie bei den Regenwürmern aus offenen, mit mächtigen Wimperflammen versehenen Kanälen, bei den Blutegeln aus dünnen, auf sich selbst zurückgewundenen geschlossenen Schläuchen, ohne jegliche Spur einer Flimmerung im Inneren.

Digitized by Google

3. Die offenen Nephridien der Brachiopoden. Die Nephridien der Brachiopoden sind zweifellos auf offene Segmentalorgane zurückzuführen, treten aber zumeist nur in einem, seltener in zwei Paaren auf. Sie bestehen stets aus einem kürzeren oder längeren Nephridialschlauch, der von einem flimmernden Zylinderepithel ausgekleidet ist, sowie aus einem weiten, gleichfalls stark bewimperten Trichter, der sich in die Leibeshöhle öffnet. Der Nephridialschlauch ist häufig intensiv gefärbt und mündet durch einen Porus nach außen. Das ganze Organ dient zugleich als Geschlechtsausführgang.

4. Die modifizierten Segmentalorgane der Gliedertiere. 4a) Schalen- und Antennendrüse der Krebse. Gleichfalls noch ziemlich unmittelbar lassen sich die genannten Exkretionsorgane der Krebse an die typischen Segmentalorgane der Gliederwürmer anschließen. Beide sind je in einem Paar vorhanden, und zwar gehört die Antennendrüse dem Segment der 2. Antenne, die Schalendrüse dem der 2. Maxille an. Den Vorfahren des Krebsstammes kamen beide Organe wohl gleichzeitig zu, bei den heute lebenden Vertretern derselben ist ihre Verteilung eine derartige, daß die Antennendrüse im wesentlichen das Exkretionsorgan der höheren Krebse, der Malakostraken, darstellt, während die Schalendrüse vorzugsweise bei den niederen Krebsen, den Entomostraken, sich findet. Indessen ist diese Regel nicht ganz streng durchgeführt. Bei den Entomostraken tritt wenigstens auf Larvenstadien die Antennendrüse auf und hält sich bei einzelnen Formen, wie gewissen Daphniden, zeitlebens als rudimentäres Gebilde; und andererseits findet sich die Schalendrüse auch bei Malakostraken, bei Isopoden, in voller Ausbildung, bei anderen, wie Nebalia und Decapodenlarven, in mehr oder weniger rudimentärem Zustande.

Der Bau beider Exkretionsorgane ist im wesentlichen der gleiche, drei Abschnitte lassen sich überall an ihnen unterscheiden: das Endsäckchen, der Nierenkanal und der Ausführgang. Am einfachsten liegen die Verhältnisse bei der Schalendrüse der Entomostraken (Fig. 16 A). Am innersten Ende findet sich das blindgeschlossene erweiterte Endsäckchen, gebildet von einer regelmäßigen Lage niederer Epithelzellen. Durch einen verengten Hals geht das Endsäckchen über in das zumeist in mehrere Schleifen gelegte Nierenkanälchen, dessen Wandzellen häufig bei fehlenden Zellgrenzen eine Art Syncytium darstellen und eine streifige Struktur aufweisen, die man in einzelnen Fällen auf einen wabigen Aufbau des Protoplasmas zurückgeführt hat. Es verliert sich diese streifige Struktur zumeist in dem äußeren Abschnitt des Nierenkanälchens, welches schließlich in den eigentlichen Ausführgang übergeht, der seinerseits einer Einfaltung der äußeren Epidermiszellen seine

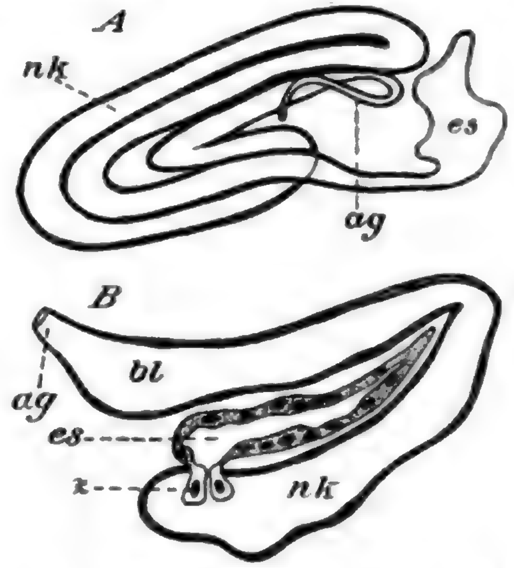


Fig. 16. A Schalendrüse eines Phyllopoden (Limnadia lenticularis). Nach M. Nowikoff, Zeitschr. f. wiss. Zool., 78. Bd., 1905; B Schalendrüse einer Assel (Porcellio). Nach A. Ter-Poghossian, Zeitschr. f. Naturwiss., 81. Bd., 1909. ag Ausführgang, bl Harnblase, es Endsäckchen, nk Nierenkanälchen, z Trichterzellen.

Entstehung verdankt. Die Ausmündung erfolgt in der Umgebung der 2. Maxille. Das ganze Organ liegt in der Kopfregion und zwar innerhalb der Schalenduplikatur, welche den Körper vieler Entomostraken umschließt, daher auch der Name. Zahlreiche Konnektivfasern befestigen Endsäckchen wie Nierenkanälchen an den umgebenden Organen und an der Hypodermis. Rückbildungen mannigfacher Art erleidet die Schalendrüse schon innerhalb der Gruppe der Entomostraken bei parasitischen Copepoden und Cirripedien.

Das Gesagte gilt zunächst im wesentlichen für Entomostraken. Die Schalendrüse der Isopoden (Fig. 16 B) zeigt in ihrem Bau noch eine weitere wichtige Differenzierung. Zwar ist auch hier ein wohlentwickeltes Endsäckchen von länglicher Gestalt sowie ein bald mehr, bald weniger zahlreiche Schlingen bildender Nierenkanal vorhanden, aber weiter liegt an der Uebergangsstelle dieser beiden Abschnitte ein Kranz von vier kreuzweise gestellten Zellen, die einen engen Kanal zwischen sich einschließen und tief in das Lumen des Nierenkanälchens hineinragen. Ein elastisches oder muskulöses Band umzieht diesen Zellenring, der wohl funktionell einen Klappenapparat darstellt, dazu bestimmt, den Uebertritt von Exkreten aus dem Nierenkanälchen in das Endsäckchen zu verhindern. Es sind solche Uebergangs-

Digitized by Google

zellen übrigens auch bei Copepoden gefunden worden. Eine weitere Besonderheit der Isopoden-Schalendrüse besteht darin, daß das Nierenkanälchen vor dem Uebergang in den Ausführgang eine ampullenartige Erweiterung erfährt, als eine Art Harnblase aufweist.

Die Antennendrüse gleicht in ihrer einfachsten Form, so wie sie sich etwa bei den Schizopoden darbietet, durchaus der Schalendrüse. Auf ein aus niederen Zellen zusammengesetztes Endbläschen folgt ein langes gewundenes Harnkanälchen mit streifenartiger Struktur seiner Zellelemente, dieses erweitert sich zu einer Harnblase und mündet schließlich durch einen kurzen Ausführgang am Basalglied der 2. Antenne aus. Auch der nämliche, aus vier Zellen bestehende Klappenapparat ist vorhanden. Das Organ liegt als Ganzes im Bereich des vorderen Cephalothorax zu beiden Seiten des Kaumagens.

Einen sehr hohen Grad von Komplikation erreicht aber dann die Antennendrüse bei den dekapoden Krebsen, so daß der ursprüngliche Bauplan häufig kaum

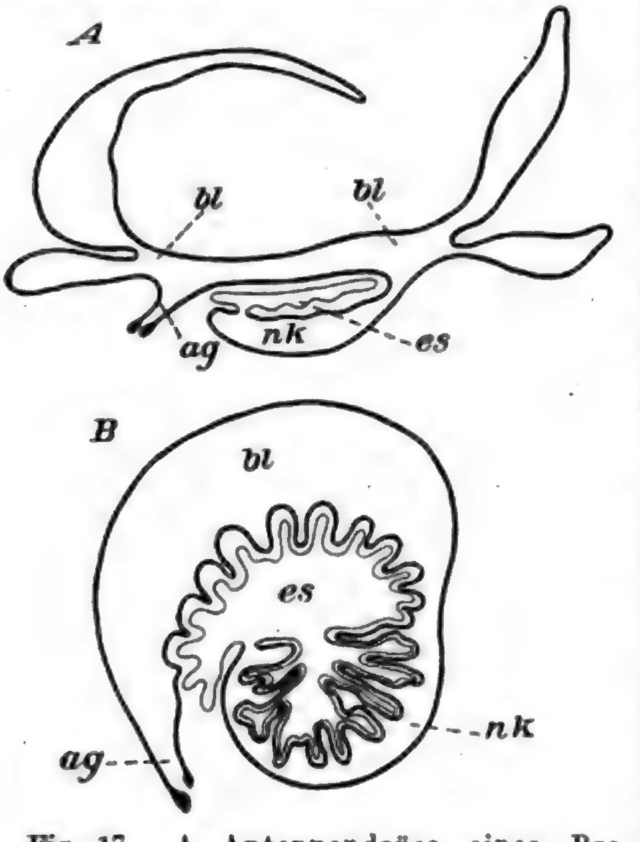


Fig. 17. A Antennendrüse eines Brachyuren (Stenorhynchus phalangium); B desgleichen von einem Macruren (Arctus ursus). Nach P. Marchal, Arch. Zool. expér. et génér. (2. série) tome X, 1892. ag Ausführgang, bl Harnblase, es Endsäckchen, nk Nierenkanälchen.

noch zu erkennen ist. Gleichzeitig nimmt sie dabei sehr bedeutend an Umfang zu und füllt den vorderen Teil des Cephalothorax fast völlig aus. Immerhin lassen sich der Analyse ihres Baues die drei uns bekannten Abschnitte durchaus zugrunde legen (Fig. 17). Das Endsäckchen wird hier in der Regel als Sacculus bezeichnet. Es stellt in nur wenigen Fällen ein einfaches Bläschen dar, wie bei manchen Krabben (Fig. 17 A), zumeist ist es vielfach gefaltet (Fig. 17 B) oder sein Inneres durch Scheidewände in zahlreiche Unterabteilungen zerlegt. Die Wandung bildet ein ziemlich hohes Epithel, dessen Zellen von Vakuolen und Granulationen erfüllt sind. Durch eine kleine Oeffnung mündet der Sacculus in einen unter ihm gelegenen umfangreichen Drüsenabschnitt, in das sogenannte Labyrinth, welches nichts anderes darstellt, als den inneren Abschnitt des ursprünglichen Nierenkanälchens, nur daß dieser jetzt stark erweitert ist und sogar vielfach durch Scheidewände und Bälkchen in seinem Inneren in ein Maschenwerk zerlegt sein kann. Häufig senkt sich ferner die Sacculuswand mit zahlreichen verästelten Aussackungen von oben her tief in die Wand des Labyrinths ein (Fig. 17 B). Das Epithel des Labyrinths besteht ganz wie bei den einfachen Nierenkanälchen aus den charakteristischen gestreiften Zellen. Der distale Abschnitt des Nierenkanälchens ist zu einer dünnwandigen Blase umgewandelt, die meist bauchig aufgetrieben erscheint und eine ganz ungeheure Ausdehnung gewinnen kann, indem von einem zentralen Sacke aus zahlreiche lappenartige Fortsätze ausgehen (Fig. 17 A), die sich zwischen Magen, Leber, Kaumuskeln und Speiseröhre einschieben und dieselben überdecken. Bei den Anomuren erreicht die Blase wohl das Maximum ihrer Entwickelung. Sie sendet hier vielfach anastomosierende Fortsätze zwischen die Organe hinein und erstreckt sich mit einer hinteren Aussackung durch das ganze Abdomen bis zum Hinterleibsende. Bei den Macruren verschmelzen häufig die beiderseitigen Blasen zu einem einzigen unpaaren System mächtiger Blasenräume. Histologisch weisen die abgeplatteten Wandzellen der Blase ebenfalls eine streifige Struktur auf. Schließlich geht der Endabschnitt in einen kurzen Ausführgang über, der im Bereiche der Basalglieder der 2. Antenne ausmündet. Die Mündung selbst ist häufig mit einem besonderen beweglichen Kalkstückchen, dem Operculum, versehen, welches die Entleerung des Harns reguliert.

Wohl mit am kompliziertesten ist die Antennendrüse des Flußkrebses gebaut, gewöhnlich infolge ihrer vorwiegend grünlichen Färbung als „grüne Drüse“ bezeichnet. Sacculus und Labyrinth sind in zahlreiche komplizierte Unterabteilungen zerlegt, die sich schalenförmig übereinander lagern und schließlich wiederum in eine ovoide Blase

übergehen, die ihrerseits unter trichterförmiger Verengung sich in den Ausführgang fortsetzt.

Die Blutversorgung erfolgt bei den einfacher gebauten Typen der Crustaceennephridien dadurch, daß das Organ von allen Seiten her von der Blutflüssigkeit umspült wird und höchstens um Endsäckchen und Nierenkanälchen sich besondere Blutlakunen ausbilden. Bei den höheren Krebsen wird dagegen die Blutversorgung durch besondere Gefäße geregelt, von denen das wichtigste ein Seitenast der Antennenarterie ist, der in den Sacculus eindringt. Die Gefäße gehen schließlich in Blutlakunen über, die namentlich den Sacculus in mächtiger Ausdehnung umspülen, aber auch um das Labyrinth ein reich entfaltetes Netzwerk bilden.

Sowohl Endsäckchen (Sacculus) wie Nierenkanälchen (Labyrinth) sind an der Exkretion beteiligt. Der in der Blase angesammelte Harn stellt eine wässerige Flüssigkeit dar, die eine besondere organische Säure enthält.

Unter den mannigfachen morphologischen Deutungsversuchen der Crustaceenniere darf jetzt wohl zweifellos die Deutung allein noch als berechtigt angesehen werden, welche unter Heranziehung des Annelidennephridiums in dem Endsäckchen ein reduziertes Cölom sieht und in dem Nierenkanälchen das Homologon des eigentlichen Segmentalorgans. Diese Deutung wird wesentlich gestützt durch die Entdeckung der eigenartigen Verschlußzellen am Uebergang des Endsäckchens in das Nierenkanälchen. Ein Vergleich dieser Zellen mit den bewimperten Endzellen des Annelidennephridiums liegt trotz fehlender Wimperflammen sehr nahe. Es finden sich übrigens solche Zellen, wie hier noch bemerkt sein mag, nicht nur bei den oben geschilderten einfacheren Typen, sie scheinen auch an den entsprechenden Stellen der kompliziert gebauten Dekapodenniere in Form besonders strukturierter großer Zellen aufzutreten. Auch entwickelungsgeschichtlich scheint sich die eben angeführte Deutung stützen zu lassen, insofern bei mehreren Dekapoden ein doppelter Ursprungsort der Niere nachgewiesen ist. Der Sacculus entsteht aus mesodermalen Elementen, das Labyrinth dagegen und die ausführenden Abschnitte aus nach innen verlagerten Ektodermzellen.

4b) Nephridium von Limulus. Auch an diesem lassen sich noch unschwer die gleichen Abschnitte wie an der Crustaceenniere feststellen (Fig. 18). Die Endsäckchen sind hier in größerer Zahl vorhanden, und zwar jederseits vier. Sie liegen im Bereich des 2. bis 5. Extremitätenpaares in die Muskulatur des Cephalothorax eingebettet und stellen lappenartige Gebilde dar, von denen das erste am kleinsten, das letzte am größten ist. Ihr Inneres bildet ein Netzwerk stark verzweigter, von einem abgeplatteten Epithel ausgekleideter Röhrchen. Embryonal werden diese Endsäckchen in noch größerer Zahl angelegt, insofern dann auch dem Segment des 1. und 6. Extremitätenpaares solche zukommen, aber bald wieder schwinden. Ventralwärts werden die vier Endsäckchen durch einen längsverlaufenden Verbindungsgang vereinigt, der aus einem groben Netzwerk anastomosierender Röhren besteht und in

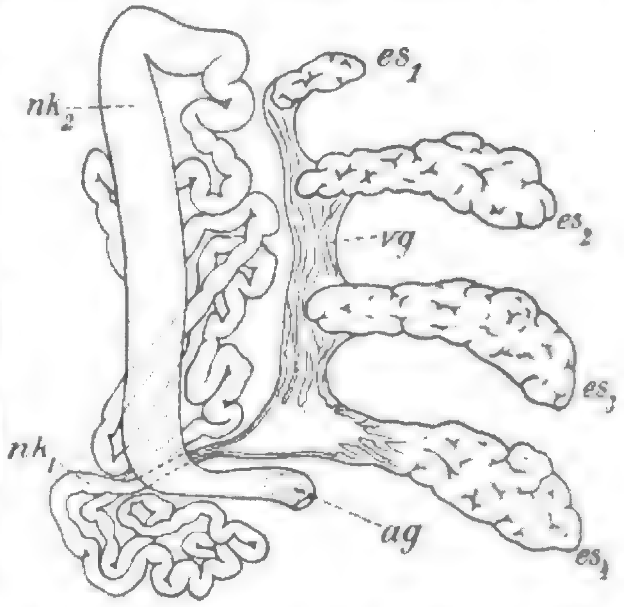


Fig. 18. Coxaldrüse von Limulus polyphemus. Nach W. Patten und A. P. Hazen, Journ. of Morphol., Vol. 16, 1900. ag Ausführgang, nk Nierenkanal, es Endsäckchen, vg Verbindungsgang derselben.

seinem hinteren Abschnitt sich in einen von platten Zellen umschlossenen Vorraum erweitert.

An letzteren schließt sich dann erst der eigentliche Nierenkanal an. Derselbe beginnt mit dünnem Hals, bildet einen vielfach gewundenen, nach vorn bis zum vordersten Endsäckchen hinziehenden Knäuel, biegt dann unter sehr beträchtlicher Erweiterung rechtwinklig nach hinten um und läuft als gerades Rohr bis zum 4. Endsäckchen zurück. Ein erneuter scharfer Knick führt ihn nach kurzem Verlauf zu dem eigentlichen Ausführgang hin. Letzterer besitzt gemäß seiner ektodermalen Herkunft dicke, von Chitin ausgekleidete Wände, wogegen der eigentliche Nierenkanal von einem kubischen Epithel ohne deutliche Zellgrenzen umschlossen wird. Die Ausmündung erfolgt an der Basis des 5. Beinpaares.

Entwickelungsgeschichtlich entstehen die Endsäckchen aus Wandzellen der Mesoderm-

Digitized by Google

somiten ihres zugehörigen Segmentes, der Nierenkanal dagegen allein aus einer Ausstülpung des im Segment der 5. Extremität gelegenen somatischen Mesoderms. Er wächst von hier lang rohrenförmig aus und verschmilzt ferner mit einer ihm entgegenkommenden Ektodermeinstülpung.

4c) Coxaldrüsen der Arachnoideen. Die Coxaldrüsen sind stets nur in einem Paar vorhanden und stellen einfache oder gewundene, im Cephalothorax gelegene Schläuche dar, an denen die morphologische Gliederung in drei Abschnitte nicht selten noch deutlich zu erweisen ist. So beim Skorpion, wo das Organ mit einem Endsäckchen beginnt, das aus zahlreichen verzweigten Röhrchen sich zusammensetzt, dünne von einem Plattenepithel überzogene Wandungen besitzt und allenthalben von Bluträumen durchzogen wird. Die Räume dieser Röhrchen gehen unter Vermittelung einer Region undifferenzierter körniger Zellen kontinuierlich über in den weiten Nierenkanal, der in vielfach gewundenem Knäuel das Endsäckchen einschließt. Seine Wandung zeigt wiederum wenigstens in der peripheren Plasmazone deutliche Querstreifung. Es schließt sich dann endlich der eigentliche Ausführgang an, der an der Basis der 5. Extremität (= 3. Beinpaares) ausmündet.

Besonders klar zu erkennen ist ferner die Dreiteilung der Coxaldrüse bei Phalangiden (Afterspinnen). Auch hier ist ein inneres, in diesem Falle sackförmig erweitertes Endbläschen zu unterscheiden, weiter ein langer, zum Teil knäuelartig aufgewundener Nierenkanal und endlich ein ausführender Abschnitt, der noch dazu eine besondere Harnblase entwickelt. Die Ausmündungsstelle liegt auch hier im Bereiche des 3. Beinpaarsegmentes.

Nachgewiesen sind Coxaldrüsen ferner ganz allgemein bei Pseudoskorpionen, Pedipalpen und Solpugiden, bei letzteren vor allem darin von dem gewöhnlichen Verhalten abweichend, daß sie sich hinter dem 1. Beinpaar nach außen öffnen sollen. Unter den echten Spinnen sind Coxaldrüsen in typischer Ausbildung nur noch bei den Tetrapneumones (Mygaliden, Atypus) anzutreffen, wo sie jederseits im Cephalothorax vielfach gewundene Drüsenmassen darstellen und an der Basis des 3. Beinpaares ausmünden. Bei den übrigen Spinnen, bei den Dipneumones, sind Coxaldrüsen nur noch bei jungen Tieren mächtiger entwickelt, münden aber hier stets wie bei den Solpugiden an der Basis des 1. Beinpaares aus. Bei alten Tieren ist das Organ rückgebildet. In ihrer höchsten Entfaltung tritt die Coxaldrüse unter den genannten Spinnen bei den Ageleniden auf, am stärksten reduziert ist es bei den Epeiriden. Bei den Milben (Acarinen) muß das Vorhandensein von Coxaldrüsen als durchaus zweifelhaft angesehen werden.

Wie bei den Krebsen und bei Limulus so sind auch bei den Spinnen die Exkretionsorgane als Ueberreste ursprünglich segmental angeordneter Nephridien anzusehen. Diese Auffassung wird dadurch bestätigt, daß hier bei den Spinnen, ähnlich wie bei Limulus, rudimentäre Anlagen von Coxaldrüsen in den Segmenten aller vier Beinpaare angetroffen werden. Eine unmittelbare Homologie der geschilderten Organe von Krebsen, Limulus und Spinnen besteht dabei wohl nicht, da sie im einzelnen, sogar innerhalb der Gruppe der Spinnentiere selbst, wechselnden Segmenten angehören.

Entwickelungsgeschichtlich geht beim Skorpion der Nierenkanal aus der somatischen Wand des im 3. Beinpaarsegment gelegenen Cölomsäckchens hervor.

4d) Nephridien von Peripatus. In sehr viel weniger stark modifizierter Form begegnen wir dagegen Segmentalorganen bei Peripatus, jener ursprünglichen Form, welche den Uebergang von Anneliden zu Tausendfüßen und Insekten vermittelt. Zunächst kommt hier wieder jedem Segment des gleichmäßig gegliederten Körpers je ein Paar solcher Organe zu, mit einziger Ausnahme der vordersten und hintersten Segmente. An jedem Segmentalorgan (Fig. 19)

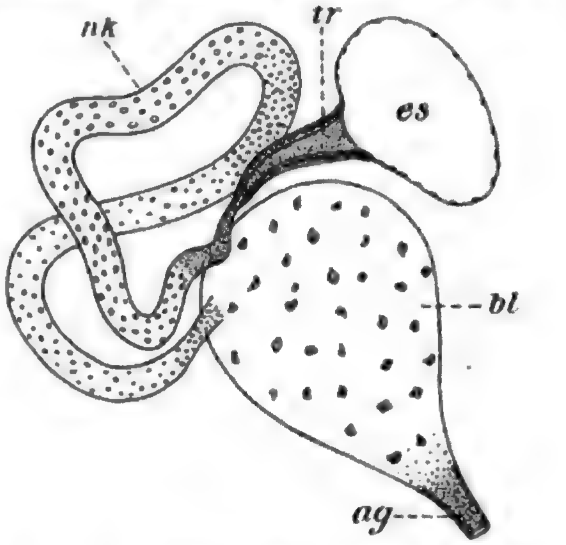


Fig. 19. Nephridium von Peripatus capensis. Nach F. M. Balfour, Quart. Journ. microsc. science. N. S., Vol. 23, 1883. Etwas modifiziert. ag Ausführgang, bl Harnblase, es Endsäckchen, nk Nierenkanal, tr Trichter.

lassen sich fünf Abschnitte unterscheiden. Zunächst der äußeren Körperoberfläche liegt der von kleinen Epithelzellen gebildete Ausführgang, der in einer Grube an der Basis der Beine ventralwärts nach außen führt. Nach innen setzt er sich fort in eine erweiterte Sammelblase, deren Wandung

Digitized by Google

aus sehr stark abgeplatteten Zellen besteht. Aus der Blase entspringt sodann ein mehrfach gewundener Kanal, der eigentliche Nierenkanal, dessen Wandzellen in den einzelnen Abschnitten bald dichter, bald weiter gestellt sind, bald klein und kubisch, bald groß und abgeflacht erscheinen. Alle sind von zahlreichen Exkretkörnchen erfüllt. Der Nierenkanal verengt sich schließlich und geht dann unter plötzlicher Erweiterung in einen neuen Abschnitt, eine trichterartige Bildung über, deren dicke Wände aus einem mehrschichtigen Zylinderepithel gebildet werden. An seinem inneren Ende öffnet sich der Trichter, der nie auch nur eine Spur von Bewimperung zeigt, mit erweitertem Lippenrand in den letzten Abschnitt des Nephridiums, in den Endsack, der eine dünnwandige Blase darstellt und morphologisch als ein abgegliederter Teil der Leibeshöhle aufzufassen ist.

In den einzelnen Segmenten können die Nephridien mancherlei Umbildungen erleiden. Im ersten und zweiten Körpersegment sind sie ganz rudimentär, im dritten wandeln sie sich zu den Speicheldrüsen des erwachsenen Tieres um, im Genitalsegment werden sie zu den Geschlechtsgängen. Entwickelungsgeschichtlich geht der Ausführgang aus einer Einstülpung des Ektoderms hervor, während das ganze übrige Nephridium aus dem Cölom entsteht. In jedem Segment zerfällt das beiderseitige Cölomsäckchen in einen dorsalen und einen ventrolateralen Abschnitt. Der erstere erfährt eine vollständige Auflösung, der letztere wandelt sich unmittlebar in die oben beschriebenen Abschnitte des Nephridiums, von der Harnblase bis zum Endsack um.

Das ganze Exkretionsorgan von Peripatus ist durchaus homolog dem Nephridium der Anneliden, dessen einzelne Bestandteile noch sämtlich vorhanden sind.

5. Die Nieren der Mollusken. Auch die Nieren der Mollusken werden vielfach unmittelbar von den Segmentalorganen der Anneliden abgeleitet, und zwar vergleicht man dem Cölomsäckchen das Perikard, in welches stets der innerste Endabschnitt der Niere mit einem Wimperkanal einmündet, dem Nephridialkanälchen den eigentlichen Nierensack. Am schwersten mit dieser Auffassung in Einklang zu bringen sind die Tatsachen der Ontogenie, auf welche sich mancherlei Einwände gegen diese Auffassung gründen.

Die Nieren der Mollusken sind ursprünglich stets in einem Paar vorhanden, sekundär kann aber bei abgeleiteten Typen durch Reduktion der einen Niere ein einseitig gelagertes unpaares Organ gebildet werden. Alle Molluskennieren stimmen ferner in ihrem Bau insofern überein, als sie konstant zwei Oeffnungen ihres sackförmigen Hauptabschnittes aufweisen. Die eine derselben ist als Perikardialnierenöffnung nach dem Perikard hin gerichtet, die zweite führt als äußere Mündung nach außen.

Wir beginnen mit den primitivsten Formen, mit einem Vertreter der Amphineuren, mit Chiton (Fig. 20). Die Niere jeder Seite

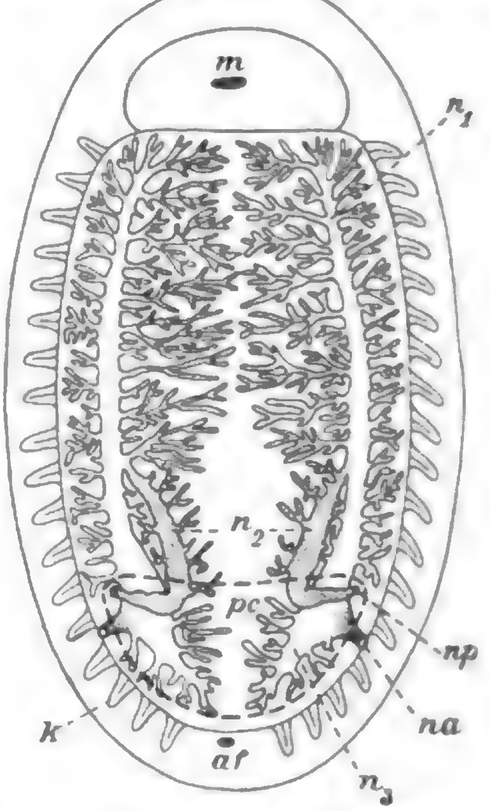


Fig. 20. Nierensystem von Chiton. Aus A. Lang, Lehrbuch der vergl. Anatomie der wirbellosen Tiere. Mollusca. 2. Aufl., bearbeitet von K. Hescheler, 1900. af After, k Kiemen, m Mund, n_{1-3} die drei Nierenschenkel, na Nierenausführgang, np Perikardialnierengang, pc Pericard.

besteht aus einem Y-förmigen Kanal, dessen längerer Schenkel nach vorn gerichtet ist und hier blind endet, während die beiden kürzeren, im hinteren Körperabschnitt gelegenen Schenkel die beiden charakteristischen Nierenöffnungen tragen. Und zwar öffnet sich der eine direkt in das gleichfalls im hinteren Körperabschnitt befindliche Perikard, der andere zeigt eine sackförmige Erweiterung seiner mittleren Partie, von der dann der kurze Ureter ausgeht. In alle drei Schenkel münden vielfach gelappte Kanälchen ein, die besonders in der vorderen Körperregion sehr stark entwickelt sind. Durch Reduktion des vorderen Schenkels kann die Gestalt der Niere vielfach mehr V-förmig werden, dazu können noch mannigfache Komplikationen durch Ausbildung von Nebenschläuchen hervorgerufen werden.

Digitized by Google

Ausgekleidet ist die Niere in allen ihren Teilen von einem kubischen Flimmerepithel, in dessen Plasma zahlreiche Vakuolen und Harnkügelchen gelegen sind.

Auch bei den Muscheln ist die Niere (hier, namentlich früher, gewöhnlich als Bojanussches Organ bezeichnet) noch durchaus paarig und symmetrisch zu beiden Seiten des Körpers gelagert. In ihrer einfachsten Form stellt sie einen glattwandigen, U-förmig geknickten Schlauch dar, an dessen einem Zipfel die Perikardialnierenöffnung und an dessen anderem Ende die äußere Mündungsstelle gelegen ist. Zumeist erfahren die beiden Nierenschenkel dann aber noch weitere Komplikationen. So auch bei unserer Teichmuschel, Anodonta (Fig. 21).

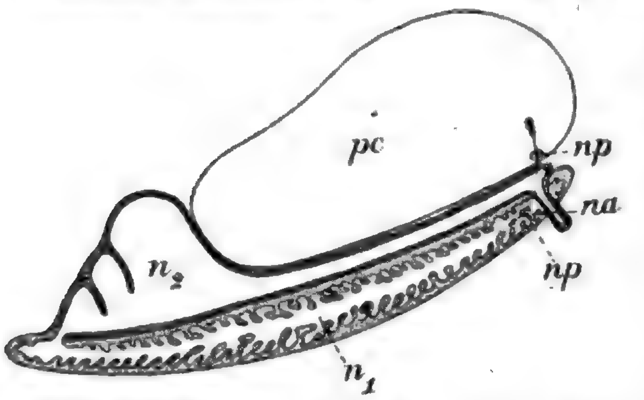


Fig. 21. Nierensystem der Teichmuschel (Anodonta). Nach W. M. Rankin, Jen. Zeitschr. f. Naturwiss., 24. Bd., 1890. $n_{1,2}$ die beiden Nierenschenkel, na Nierenausführgang, np die beiden Enden des Perikardialnierenganges, pc Perikard.

Der innere Schenkel (n_1) entwickelt sich zu dem allein sekretorisch tätigen Nierensack, dessen Wand zahlreiche, in das Innere vorspringende Falten aufweist. Ueberzogen ist diese Wand von einem drüsigen Epithel, dessen Zellenelemente gleichmäßig lange Cilien tragen und im Inneren von dunkelgrünen oder braunen Exkretkörnchen erfüllt sind. Vom Vorderende dieses Nierensackes geht der mit kurzen Cilien besetzte Perikardialnierengang ab, der direkt in das Perikard einmündet und an seinem gegen die Niere gewendeten Abschnitt ein Büschel langer Cilien trägt. Ihre Bewegung erzeugt eine lebhafte nach der Niere hin gerichtete Strömung. Das Hinterende des Nierensackes biegt um in den dorsal und nach außen von ihm gelegenen Nierengang (n_2), der hinten erweitert und in mehrere Kammern zerlegt ist, nach vorn hin aber sich beträchtlich verengt. Histologisch unterscheidet sich der Nierengang von dem Nierensack vor allem dadurch, daß seine Wände glatt sind und daß seinen Epithelzellen die Einlagerungen von Exkretkörnchen fehlen. Im vordersten Bezirk verschmelzen ferner bei Anodonta die beiderseitigen Nierengänge in der Mediane miteinander, dennoch aber gibt jeder ein besonderes, schräg nach außen und abwärts gerichtetes kurzes Rohr als eigentlichen Nierenausführgang ab, der jederseits zwischen den Lamellen der äußeren Kiemen nach außen mündet.

Für die Niere der Gastropoden bildet das Ausgangsstadium gleichfalls ein Paar symmetrisch gelegener Organe, die beiderseits vom Enddarm in die Mantelhöhle ausmünden und die ferner je durch eine innere Oeffnung mit dem Perikard kommunizieren. In Verbindung mit der asymmetrischen Aufwindung des Schneckenkörpers beginnt aber die Niere der einen Seite, und zwar die vor der Torsion linke, sich zu reduzieren und schließlich ganz zu schwinden. Bei niederen Prosobranchiern sind noch zwei Nieren vorhanden, die eine freilich bereits als stark rückgebildetes Organ. Dies zeigt beispielsweise Patella (Fig. 22), bei welcher Schnecke

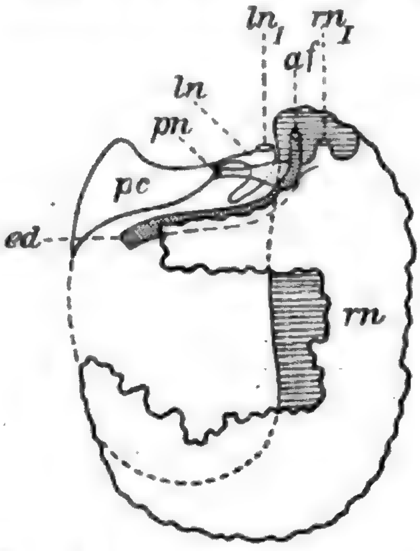


Fig. 22. Nierensystem eines Prosobranchiers (Patella). Aus H. Simroth, Gastropoda prosobranchia, in Bronns Klassen und Ordnungen des Tierreichs, 3. Bd., Mollusca, II. Abt., 1896 bis 1907. af After, ed Enddarm pc Perikard, pn Perikardialnierenöffnungen, ln linke Niere und deren Ausführgang (ln_1), rn rechte Niere mit Ausführgang (rn_1).

wohl beide Nieren noch entwickelt sind, die linke aber an Umfang ganz außerordentlich gegen die rechte zurücktritt. Beide Nieren besitzen aber noch einen besonderen Ausführgang, weisen ferner noch je einen wohlentwickelten Perikardialnierengang auf. Beide sind noch funktionierend und im Inneren von voluminösen, mit Konkretionen erfüllten Nierenzellen ausgekleidet. Bei den höheren Prosobranchiern, den Monotocardiern, ist dann die Niere stets unpaar und stellt hier eine geräumige, vom Nierenepithel ausgekleidete Tasche dar. Auch bei Opisthobranchiern und Pulmonaten ist stets nur

Digitized by Google

eine einzige Niere vorhanden, ihr Verhalten sei etwas genauer von unserer Weinbergsschnecke geschildert (Fig. 23). Sie liegt hier als ein gelblich- bis grauweiß gefärbtes Organ im hinteren Abschnitt der Lungenhöhle. Der eigentliche Nierensack ist im

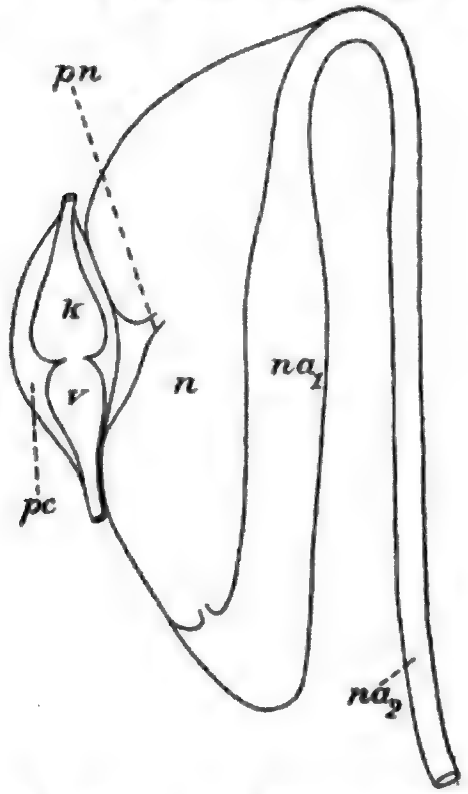


Fig. 23. Niere der Weinbergschnecke (Helix pomatia). Nach G. Stiasny, Zool. Anz., 26. Bd., 1903. k Herzkammer, n Nierensack, $na_{1,2}$ primärer und sekundärer Harnleiter, pc Perikard, pn Perikardialnierenöffnung, v Herzvorhof.

Inneren von zahlreichen lamellösen Falten seiner Wandung fast ganz erfüllt, an ihnen sitzen die zylindrischen, von Harnkonkrementen erfüllten Nierenzellen. Ein flimmernder Kanal führt aus diesem Sack als Perikardialnierengang in das Perikard hinein, während an der nach vorn gerichteten Spitze der Nierensack in den primären Harnleiter übergeht. Letzterer liegt als erweiterter platter Sack der eigentlichen Nierenwand fest an, zieht an ihr entlang nach hinten, biegt dann scharf um und verläuft als sekundärer Harnleiter in Form eines engen Rohres dicht neben dem Enddarm wieder nach vorn, um hier in der Umgebung des Atemloches auszumünden.

Und endlich fügt sich auch das Nierensystem der Cephalopoden durchaus dem Grundplan der Molluskenniere ein (Fig. 24). Wir haben auch hier, wenigstens im ursprünglichen Zustande, zwei im oberen und hinteren Teil des Eingeweidesackes gelegene Nierensäcke, die in typischer Weise einerseits mit dem Perikard, andererseits mit der Mantelhöhle, also mit der Außenwelt kommunizieren. Die Wandung der Nierensäcke ist zum größeren Teile glatt und von einem platten Epithel überzogen; nur an der vorderen Wand, wo die großen, zum Herzen zurückkehrenden Nierengefäße sich gegen das Lumen der Nierensäcke vorstülpen, ist das Nierenepithel drüsig entwickelt und bildet daselbst in Zusammenhang mit hohlen Ausstülpungen der Venen traubige oder gelappte Gebilde, die sogenannten Venenanhänge, an denen sich vorzugsweise die Exkretionsprozesse abspielen. Die abgeschiedenen Stoffe gelangen zunächst in die Nierensäcke und werden von da durch die Harnleiter, welche rechts und links von der Afterpapille gelegen sind, in die Mantelhöhle und nach außen geleitet. Der Perikardialnierengang liegt wie der Harnleiter im vorderen Bereich

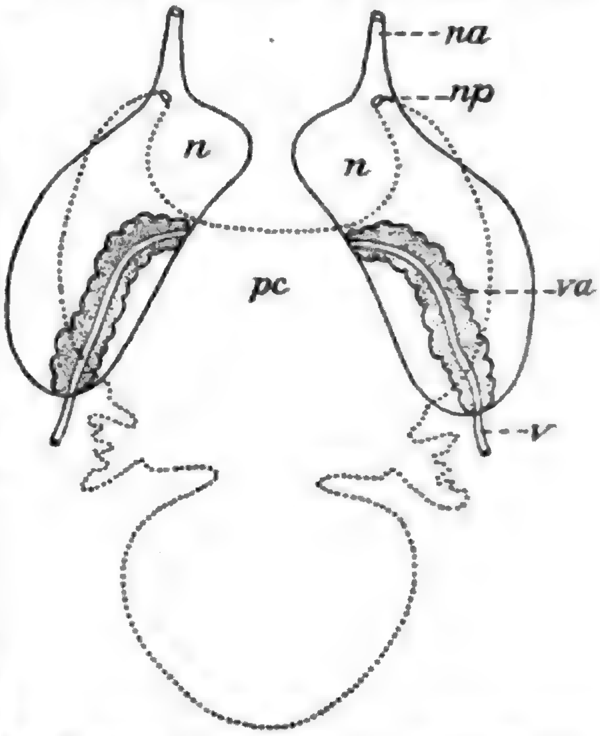


Fig. 24. Nierensystem eines Tintenfisches. Aus A. Lang, Lehrbuch der vergleichenden Anatomie der wirbellosen Tiere. Mollusca. 2. Aufl., bearbeitet von K. Hescheler, 1900. n Nierensack, na Nierenausführgang, np Perikardialnierenöffnung, pc Perikard, v Vene, va Venenanhang.

des Nierensackes, er führt in das Perikard oder wenigstens in den stark modifizierten Raum, welcher dem Perikard der übrigen Mollusken entspricht.

Im einzelnen finden sich nun noch mancherlei Besonderheiten. Zunächst werden die Nierensäcke durch Gestalt und Lage der angrenzenden Eingeweide stark beeinflußt, da letztere sich allenthalben in ihr Lumen vordrängen. Weiter treten bei den dekapoden Tintenfischen die beiderseitigen Nierensäcke in offene Kommunikation. Und endlich

Digitized by Google

haben sich bei Nautilus die Nierensäcke in zwei Paare geteilt, von denen aber dann nur dem einen Paar Perikardialnierenöffnungen zukommen, welch letztere ihrerseits selbständig geworden sind und das Perikard direkt mit der Mantelhöhle verbinden.

6. Die Nieren der Wirbeltiere. Es gebührt sich dann endlich, an dieser Stelle die Nieren der Wirbeltiere anzuschließen, weil sie, mag ihre Ableitung im besonderen auch noch so problematisch sein, in ihrem ursprünglichsten Bau vielfach an die Segmentalorgane der Anneliden erinnern. Sie bestehen alsdann aus einer Anzahl regelmäßig hintereinander angeordneter Nierenkanälchen, die durch einen Wimpertrichter in die Leibeshöhle münden und am entgegengesetzten Ende sich zu einem gemeinsamen Ausführgang verbinden.

Der gesamte exkretorische Apparat der Wirbeltiere setzt sich aus drei Systemen zusammen, die als Abkömmlinge eines ursprünglich einheitlichen Systems in Ontogenie und Phylogenie zeitlich und räumlich aufeinander folgen. Sie werden als Vorniere (Pronephros), Urniere (Mesonephros) und Nachniere (Metanephros) unterschieden. Das ursprünglichste System ist die Vorniere (Fig. 25 A), bestehend aus einer geringen Anzahl einzelner Kanälchen, die aus Differenzierungen des Cölomepithels hervorgehen. Sie sind metamer angeordnet, öffnen sich durch einen Wimpertrichter (Nephrostom) in das Cölom und münden am entgegengesetzten Ende in einen gemeinsamen Ausführgang, der als Vornierengang nach hinten zieht und in die Kloake sich öffnet. Die Vornierenkanälchen sind geschlängelt, in ihrem Verlaufe bildet sich ferner unter beträchtlicher Verdünnung der Wand eine Erweiterung aus und diese kann durch einen Gefäßknäuel (Glomerulus) eingestülpt oder wenigstens von Gefäßschlingen umschlossen werden. Es entsteht so die erste Anlage eines Malpighischen Körpers. Die Vorniere kommt zur Funktion oder könnte funktionieren bei Myxinoiden, Petromyzonten, Ganoiden, Teleostiern, Dipnoern, Batrachiern, Gymnophionen. Sie kann nicht mehr funktionieren bei Selachiern und sämtlichen Amnioten, da sie hier alsbald nach der Anlage oder noch während derselben wieder rückgebildet wird.

Das zweite Exkretionssystem ist die Urniere (Fig. 25 B), welche eine sehr viel größere dauernde Bedeutung besitzt. Ihre Anlage erfolgt ontogenetisch hinter der Vorniere, im engsten Anschluß an dieselbe, gleichfalls aus dem Cölomepithel. Auch sie besteht aus einer Anzahl von zumeist metamer angeordneten Kanälchen, die alle den gleichen Bau besitzen. Sie nehmen einen gewundenen Verlauf, stehen durch ein Nephrostom mit der Leibeshöhle in Verbindung und entwickeln einen typischen Malpighischen Körper. Durch einen ausführenden Abschnitt münden sie alle in einen gemeinsamen Gang, der unmittelbar aus dem Vornierengang hervorgegangen ist und nun als Urnierengang (= Wolffscher Gang) bezeichnet wird. Die Urniere ist das hauptsächliche Harnorgan der meisten Fische,

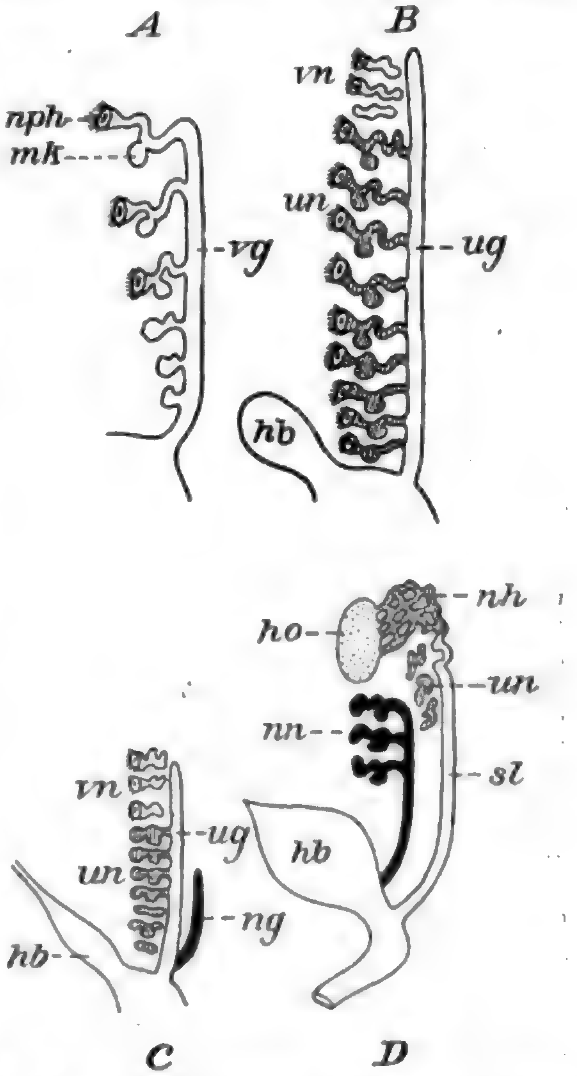


Fig. 25. A Vornierenstadium der Anamnia; B Urnierenstadium der Amphibien; C Vor- und Urnierenstadium der Amniota; D Nachnierenstadium der Amniota. Nach R. Wiedersheim, Vergleichende Anatomie der Wirbeltiere, 1902. vn Vorniere (weiß gehalten), un Urniere (schraffiert), nn Nachniere (schwarz gehalten); vg Vornierengang, ug Urnierengang, ng Nachnierengang; hb Harnblase, ho Hoden, mk Malpighischer Körper, nh Nebenhoden, nph Nephrostom.

der Selachier und der Amphibien. Bei den Amnioten erfährt sie dagegen als Harnorgan eine völlige Rückbildung, bewahrt aber ihre phylogenetisch schon sehr frühzeitig auftretenden Beziehungen zum männlichen Geschlechtsapparat.

Und wiederum im Anschluß an dieses

Digitized by Google

zweite Nierensystem entsteht kaudalwärts von ihm das dritte, die Nachniere (Fig. 25D). Aus indifferentem Anlagematerial bilden sich neue Nierenkanälchen aus, die keine Nephrostome mehr aufweisen, dagegen typische Malpighische Körperchen entwickeln. Sie verbinden sich ferner nicht mehr mit dem Urnierengang, sondern werden von einem Kanal aufgenommen, der vom Endabschnitt des Urnierengangs selbständig auswächst (Fig. 25 C) und den definitiven Ureter oder Harnleiter darstellt. Derselbe trennt sich schließlich völlig vom Urnierengang und mündet dann entweder in die Kloake oder (auf höherer Entwickelungsstufe) in die Harnblase ein. Die Nachniere stellt das typische bleibende Exkretionsorgan der Reptilien, Vögel und Säugetiere dar.

Diese drei Nierensysteme sind nicht, wie man früher zumeist annahm, als drei gesonderte selbständige Systeme aufzufassen, die in der Phylogenie einander ablösten, sondern sie sind homodyname Abschnitte eines und desselben Ahnenorgans, welches ursprünglich ein fast den ganzen Rumpf durchziehendes Exkretionsorgan darstellte, und dessen streng segmental angeordnete Bestandteile überall den gleichen Bau zeigten. Von einem solchen Ahnenorgan, einer sogenannten Holonephros, stellen sie verschieden alte Abkömmlinge dar, deren fortschreitende Entwickelungstendenz in der Ausbildung einer vermehrten Zahl von Nierenkanälchen und damit einer voluminöseren Nierenmasse besteht, wie sie die stetig sich erhöhenden Anforderungen des Wirbeltierkörpers erheischten.

Im besonderen werden nun die einzelnen Gruppen der Wirbeltiere der Reihe nach auf ihre spezielleren Verhältnisse hin zu prüfen sein. Wir beginnen mit den niederen Formen und schreiten zu den höheren fort.

Die funktionierende Niere der Cyclostomata (Fig. 26 A) wird durch eine Urniere gebildet. Dieselbe liegt in Form zweier langgestreckter Körper der Dorsalwand der Leibeshöhle an und besteht jederseits aus einem langen, das ganze Organ durchziehenden Urnierengang, dem zahlreiche, vielfach gewundene Kanälchen in metamerer Anordnung ansitzen. Sämtliche Kanälchen beginnen mit einem Malpighischen Körperchen, dagegen fehlen in erwachsenem Zustande die Wimpertrichter. Am vorderen Ende des ganzen Organs bleiben einige Vornierenkanälchen erhalten und diese münden noch mit wimpernden Nephrostomen in die Leibeshöhle. Die Ausmündung der Harngänge erfolgt auf einer besonderen Papille in den Urogenitalsinus. Beziehungen zu dem Geschlechtsapparat bestehen nirgends.

Bei den Selachiern wird die Vorniere schon frühzeitig zurückgebildet und es bleibt nur die Urniere erhalten. Und zwar vielfach in ihrer ursprünglichsten Beschaffenheit, insofern wenigstens bei einem Teil der Haie die Nephrostomen an den Nierenkanälchen zeitlebens neben den Malpighischen Körperchen bestehen bleiben. Im vorderen Bezirk der Niere können die Nephrostome sogar

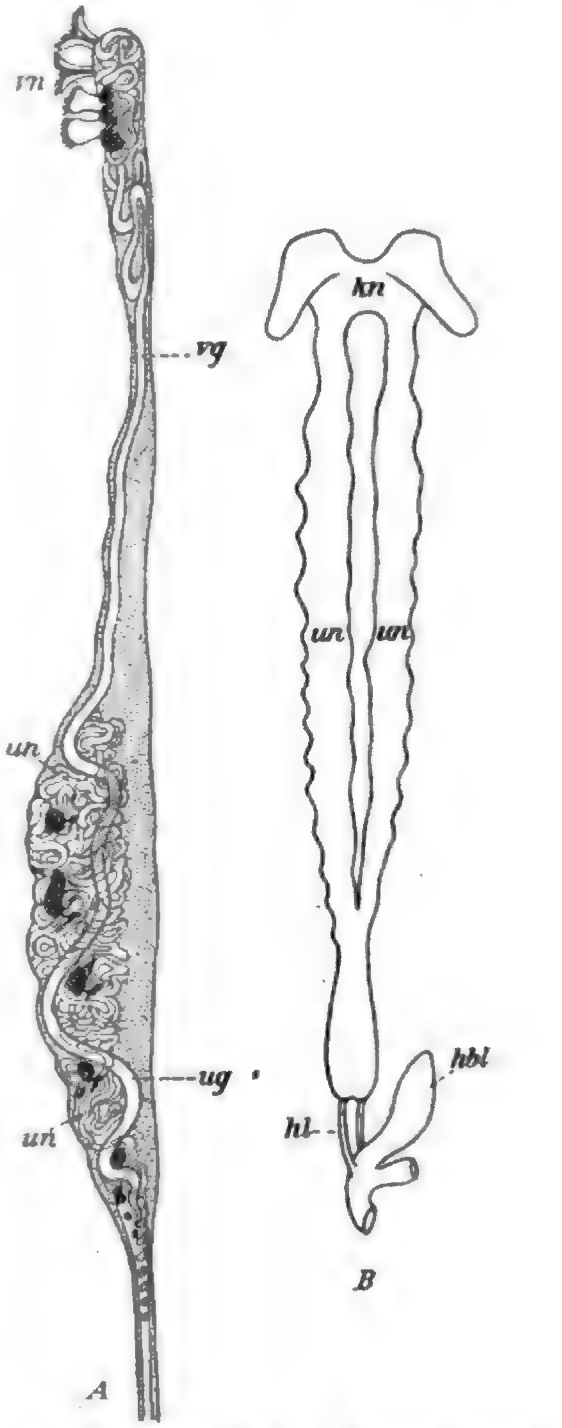


Fig. 26. A Vorniere und Urniere eines jugendlichen Petromyzon. Nach W. M. Wheeler, Zool. Jahrb., Morph., 13. Bd., 1900. B Urniere eines Knochenfisches (Perca fluviatilis). Nach B. Haller, Jen. Zeitschr. f. Naturwiss., 43. Bd., 1908. hbl Harnblase, hl Harnleiter, kn Kopfniere, ug Urnierengang, un Urniere, vg Vornierengang, vn Vorniere.

noch eine metamere Anordnung zeigen, im allgemeinen aber vermindert sich ihre Zahl mit zunehmendem Alter, um schließlich bei vielen Formen ganz zu schwinden. Als Ganzes betrachtet stellt die Urniere der Haie einen langgestreckten, häufig gelappten Körper dar, an dem sich zumeist ein bandförmiger vorderer von einem erweiterten hinteren Abschnitt unterscheiden läßt. Der bandförmige Abschnitt sendet seine Kanälchen direkt in den Urnierengang, der sich in seinem hintersten Teile zu einem Harnsinus erweitern kann, während dagegen in dem voluminöseren hinteren Nierenabschnitt die Kanälchen ihre Mündungen distalwärts verschieben, untereinander zusammenfließen und einen selbständigen Ausführgang bilden, der gleichfalls in den Harnsinus mündet. Die Sinusse der beiderseitigen Harnleiter vereinigen sich und öffnen sich schließlich auf einer Papille in die Kloake. — Im männlichen Geschlecht tritt ferner der vordere Abschnitt der Niere in Beziehung zu der Geschlechtsdrüse. Seine Kanälchen hören mit der Harnsekretion auf, übernehmen dagegen die Abfuhr der männlichen Geschlechtsprodukte in den Urnierengang, der also nun zum Samenleiter wird und unabhängig von den Harnausführgängen des hinteren Abschnittes nach außen führt.

Die bleibenden Nieren der Ganoiden sind ebenfalls die Urnieren, sie besitzen eine langgestreckte, bald kompaktere, bald verschmälerte Form. Aehnliches gilt für die Dipnoer. Bei den Ganoiden können in seltenen Fällen die Nephrostome erhalten bleiben, bei den Dipnoern fehlen sie in erwachsenem Zustande stets.

Komplizierteren Verhältnissen begegnen wir bei den Teleostiern (Fig. 26 B). Das bleibende Organ ist auch hier die Urniere. Dieselbe ist dicht der dorsalen Rumpfhöhlenwand angeschmiegt und zeigt in Form und Ausdehnung überaus wechselnde Verhältnisse. Bald ist sie sehr lang und schmal, bald kurz und gedrungen. Vielfach verschmelzen im hinteren und vorderen Bereich die beiderseitigen Nieren miteinander. Der vorderste, dem Schädel unmittelbar anliegende Abschnitt, der noch Teile der Vorniere enthält, wandelt sich in ein eigenartiges, an Lymphzellen reiches Gewebe um, das nicht mehr als Niere funktioniert; es wird dieser Abschnitt gewöhnlich als „Kopfniere“ bezeichnet. Die Nierenkanälchen sammeln sich in Harnleitern, die zum Teil in die Masse der Niere eingebettet sind und in ihrem Endabschnitt eine Erweiterung, den Harnsinus, ausbilden. Die Harnsinusse beider Seiten verschmelzen miteinander, sie vereinigen sich ferner mit einer dorsalen Ausstülpung der Kloake, so daß eine Art Harnblase zustande kommt. Die Ausmündung erfolgt meist hinter dem After, und zwar entweder durch einen einfachen Porus oder auf einer besonderen Papille. Beziehungen zu den Geschlechtsdrüsen bestehen nirgends.

Die Nieren der Amphibien lassen unmittelbar an die niederen Zustände der Selachier anknüpfen, von denen die Fische sich weit entfernt haben. Die primitivsten Verhältnisse weisen die Gymnophionen auf. Hier werden embryonal noch 12 bis 13 Vornierenkanälchen angelegt und auch die bleibende Urniere zeigt noch sehr ursprünglichen Bau. Sie bildet im erwachsenen Zustand jederseits ein langes, schmales, eingekerbtes Band, das sich aus zahllosen Nierenkanälchen zusammensetzt. Letztere behalten zeitlebens ihren ursprünglichen Aufbau aus Nephrostom, Malpighischem Korper und gewundenem Harnkanälchen bei, sind auch auf embryonalen Stadien noch rein segmental angeordnet. Im vordersten Abschnitt persistiert dieses letztere Verhalten zuweilen, später wird aber durch sekundäre Wachstumsvorgänge die Zahl der Harnkanälchen sehr beträchtlich vermehrt und es können dann schließlich bis zu tausend Nephrostome an einer Urniere gezählt werden. Gruppen von Nierenkanälchen vereinigen sich zu größeren Sammelgängen und diese münden alle in den Urnierengang.

Bei den Urodelen ist die ursprüngliche metamere Anordnung der Urnierenkanälchen sehr viel weniger deutlich, doch bleiben auch hier ihre Nephrostome zeitlebens erhalten. Ihrer Form nach stellen die Urnieren bandartig in die Länge gestreckte Organe dar, welche in einen vorderen schlankeren und einen hinteren kompakteren Abschnitt zerfallen (Fig. 27 B). Der erstere tritt nun im männlichen Geschlecht (Fig. 27 A), wie bei den Selachiern, in Beziehung zur Geschlechtsdrüse, insofern samenführende Kanälchen die männlichen Geschlechtsprodukte in das Nierenparenchym überleiten, von wo sie durch die Harnkanälchen aufgenommen und in den Urnierengang weiter befördert werden. Letzterer Gang funktioniert also dann auch hier als Samenleiter. Der hintere Abschnitt der Niere entwickelt gleichzeitig besondere lange Sammelkanäle, die unabhängig von dem Urnierengang in die Kloake münden.

Bei den Anuren liegen im allgemeinen die Verhältnisse ganz ähnlich wie bei den Urodelen, nur ist die Form der Niere in Anpassung an die Körpergestalt eine gedrungenere, ihr Umfang ist auf die mittlere Beckenregion beschränkt. Die Nephrostome sind ebenfalls noch erhalten, sie stehen aber nur noch während der Larvenperiode mit den Harnkanälchen in Verbindung. Später

Digitized by Google

lösen sie sich von ihnen los und münden eigenartigerweise in die Nierenvenen ein.

Allen Amphibien kommt eine Harnblase zu, in der sich die klare Harnflüssigkeit ansammelt. Die Blase entsteht unabhängig von den eigentlichen Urnierengängen als eine Einstülpung der ventralen Kloakenwand und kann sich ihrer Gestalt nach überaus verschiedenartig verhalten. Meist ist sie einfach sackförmig, zuweilen lang

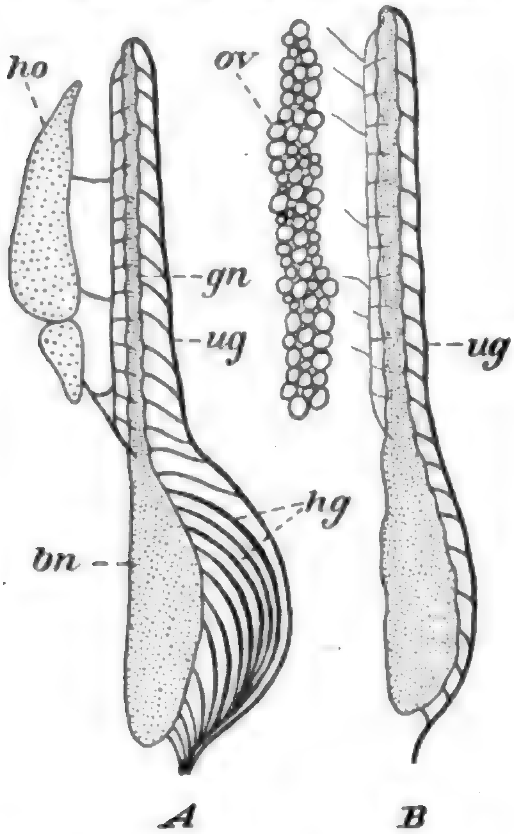


Fig. 27. Schematische Darstellung der Urniere eines Urodelen, A im männlichen, B im weiblichen Geschlecht. Nach J. W. Spengel, Arbeiten d. Zool. Inst. Würzburg, 3. Bd., 1876. bn Beckenniere, gn Geschlechtsniere, hg Harngänge, ho Hoden, ov Ovarien, ug Urnierengang.

schlauchförmig, wie bei Amphiuma, wieder in anderen Fällen am Scheitel in zwei Spitzen geteilt, die bei Alytes und Bombinator zu langen Schläuchen auswachsen.

Bei allen höheren Wirbeltieren tritt dann endlich die Urniere als funktionierendes Nierenorgan ganz zurück, und ihre Stelle wird eingenommen von der Nachniere. Bei den Reptilien treffen wir als solche mehr oder minder kompakte Organe an, die weit hinten in der Bauchhöhle liegen und nicht selten bis in die Schwanzregion hinein sich erstrecken. Bei einigen Eidechsen verbinden sich die beiderseitigen Nieren durch quere Substanzbrücken miteinander oder verschmelzen in ihren hinteren Abschnitten völlig. Eine gedrungene Form besitzt die Niere bei den meisten Echsen und Schildkröten, bei den Schlangen aber hat die langgestreckte Körperform eine ähnliche Dehnung der Nieren zur Folge, es kommt ferner hier in weiterer Folge des schmalcylindrischen Körperbaues die eine Niere vor die andere zu liegen und endlich führt die hohe Beweglichkeit der einzelnen Körperabschnitte zu einem Zerfall der Niere in breit zusammenhängende Läppchen. Im Inneren besteht die Niere aus einzelnen Harnkanälchen, deren Bau im einzelnen durchaus dem weiter unten bei den Vögeln geschilderten entspricht. Die Kanälchen sammeln sich in weiten Sammelröhren, die in den Ureter überführen. Die Harnleiter sind am längsten bei den Schlangen entwickelt, sie münden im männlichen Geschlecht zusammen mit den Samenleitern auf einem Paar gemeinsamer Urogenitalpapillen in die Kloake aus, im weiblichen Geschlecht dagegen auf selbständigen Papillen. Zumeist ist eine in die Kloake einmündende Harnblase vorhanden. Eine solche fehlt gänzlich einigen Eidechsen und ist bei Schlangen und Krokodilen nur in rudimentärem Zustande vorhanden. Bei Lacerta ist sie länglich rund und mit einem schmalen Stiel versehen, bei der Blindschleiche ist sie länger gestreckt, bei anderen am Scheitel eingekerbt. Ihr morphologischer Wert ist ein sehr verschiedener. So geht bei Schlangen und einigen Eidechsen die Blase aus einer dorsalen Ausstülpung der Kloakenwand hervor, während sie bei anderen Eidechsen, bei Krokodilen und Schildkröten einer ventralen Ausstülpung der Kloakenwand oder einer Erweiterung des Allantoisstieles ihre Entstehung verdankt. Der Harn bildet weißliche Konkremente von breiiger Beschaffenheit, doch scheiden einige Formen, wie beispielsweise die Schildkröten, auch flüssigen Harn aus.

Die Nieren der Vögel sind verhältnismäßig groß. Sie stellen zwei langgestreckte Körper dar, welche die vom Becken gebildeten Höhlungen von innen her mit ihrer Substanz ziemlich ausfüllen und daher auf ihrer Dorsalfläche die Reliefverhältnisse der inneren Beckenwand wiederholen. Die ventrale Nierenfläche ist dagegen ziemlich glatt, quere Einkerbungen zerlegen sie gewöhnlich in drei Lappen (Fig. 28 A). Häufig können ferner Verschmelzungen der beiderseitigen Nieren in der Medianebene in stärkerem oder geringerem Umfange auftreten.

Ihrem feineren Bau nach wird die Niere zu äußerst von einer zarten durchsichtigen Bindegewebshülle umschlossen, während das Innere völlig von dem dunkelbraunroten Parenchym erfüllt ist. Letzteres setzt sich aus einer Unzahl kleiner Läppchen zusammen, die dicht nebeneinander gepackt sind und die Nierenkanälchen enthalten, im Parenchym liegen ferner die größeren Sammelröhren, Gefäße und Nerven. Eine

Digitized by Google

deutliche Scheidung in Rinden- und Marksubstanz ist nicht vorhanden.

Jedes Harnkanälchen (Fig. 28 B) beginnt an der Oberfläche eines Läppchens mit einer kleinen rundlichen Bowmanschen Kapsel (I), die einen arteriellen Gefäßknäuel, den Glomerulus, umschließt. Aus dieser Kapsel entspringt ein kurzer engerer Hals, der sehr bald in einen erweiterten und mehrfach

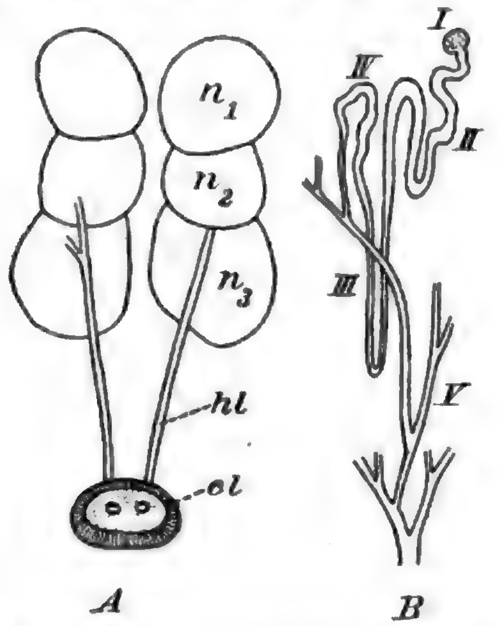


Fig. 28. A Ventralansicht des Nierensystems einer Taube, B einzelnes Harnkanälchen einer Taube. Nach H. Gadow, Vögel, in Bronns Klassen und Ordnungen des Tierreichs, VI. Bd., 4. Abt., 1891. cl Kloake, hl Harnleiter, n_1—n_3 die drei Nierenlappen, I bis V die einzelnen Abschnitte eines Harnkanälchens.

geschlängelten Abschnitt (II) übergeht. Unter erneuter Verengung setzt sich das Kanälchen dann in die lange, geradegestreckte Henlesche Schleife (III) fort, deren ab- und aufsteigender Ast dicht nebeneinander liegen. Es folgt nochmals ein etwas geschlängelter Abschnitt (IV) und dieser geht endlich in die größeren Sammelgefäße (V) über. Letztere vereinigen sich bündelweise zu stärkeren Kanälen, welche direkt in die Harnleiter einmünden. Die Epithelien der Nierenkanälchen wechseln in den einzelnen Abschnitten zwischen höherem und niederem Zylinderepithel, dagegen fehlen Flimmerzellen durchaus. Die Wände der Bowmanschen Kapsel bestehen aus mosaikartig zusammengefügten niederen Zellen.

Die Gefäßversorgung der Niere erfolgt in der Weise, daß die aus der Aorta descendens und der Arteria ischiadica entspringenden Arteriae renales sich bald nach ihrem Eintritt in die Niere je in zwei, verschiedenen Systemen angehörige Aeste spalten. Die Arterien der einen Art behandeln die Niere wie jedes andere Organ, d. h. sie lösen sich in Kapillaren auf, welche die ganze Nierensubstanz durchsetzen, und sammeln das Blut dann wieder in abführenden Nierenvenen. Die Arterienäste des zweiten Systems dienen dagegen der Harnausscheidung. Sie senden Zweige zwischen die Nierenläppchen und diese geben dann nach allen Seiten hin zahlreiche, fast kapillare Gefäße ab, von denen je eines einen zu einer Kapsel herantretenden Glomerulus abgibt. In diesem wird der Harn abgeschieden, in der Kapsel angesammelt und durch die Nierenkanälchen abgeleitet. Das austretende Gefäß des Glomerulus löst sich dann schließlich gleichfalls in ein kapillares Netzwerk auf und aus diesem gehen dann erst die abführenden Venen hervor.

Die Harnleiter entspringen von der Ventralfläche der Nieren und verlaufen als Röhren wechselnden Durchmessers nach hinten, häufig teilweise in die Nierensubstanz eingebettet. Die Mündung erfolgt schließlich auf papillenartigen Vorsprüngen in die Kloake und zwar in den mittleren Abschnitt derselben, welchen man als Urodaeum bezeichnet. Der Harn bildet eine weißliche breiige Masse, die direkt dem Kote beigemischt und mit demselben entleert wird. Sein wesentlichster Bestandteil wird hier bei den Vögeln (und ebenso bei den Reptilien) durch Harnsäure gebildet, nicht durch Harnstoff wie bei den Säugetieren. Eine Harnblase fehl tallen erwachsenen Vögeln vollständig, nur im embryonalen Leben entwickelt sich eine solche vorübergehend aus einer Erweiterung des Allantoisstieles.

Bei den Säugetieren liegen die verhältnismäßig kleinen Nieren weit vorn in der Lendenregion der Bauchhöhle. Sie sind meist dorsoventral zusammengedrückt und weisen einen konvexen Außen- sowie einen konkaven Innenrand auf (vgl. Fig. 30). Letzterer wird als Hilus bezeichnet, an ihm treten die Blutgefäße ein und aus, von ihm geht der Harnleiter ab.

Im Inneren der Nierensubstanz lassen sich zunächst eine Mark- und eine Rindenschicht scharf voneinander scheiden. Letztere enthält allein die gewundenen Teile der Harnkanälchen, erstere die gerade gestreckten Sammelröhren. Jedes Harnkanälchen (Fig. 29) beginnt auch hier mit einem Malpighischen Körperchen. Dieses selbst setzt sich, ganz wie bei den Vögeln, zusammen einmal aus der Bowmanschen Kapsel, bestehend aus dem kugelig erweiterten und einseitig eingestülpten Endabschnitt des Kanälchens, sowie weiter aus dem Glomerulus, einem bipolaren, arteriellen Gefäßnetz, welches den eingestülpten Raum der Kapsel erfüllt. Es schließen sich dann die gleichen gewundenen Abschnitte sowie die gerade gestreckte Henlesche Schleife

Digitized by Google

an, wie wir sie bei den Vögeln schon kennen lernten. Die Henleschen Schleifen liegen ganz wie die stärkeren Sammelkanäle in der Marksubstanz, die gewundenen Kanälchen, wie schon gesagt, in der Rindensubstanz.

Die Sammelkanälchen vereinigen sich zu immer stärker werdenden Sammelröhren und münden schließlich auf Vorsprüngen der Marksubstanz in einen Raum aus, der von dem erweiterten Ende des Harnleiters

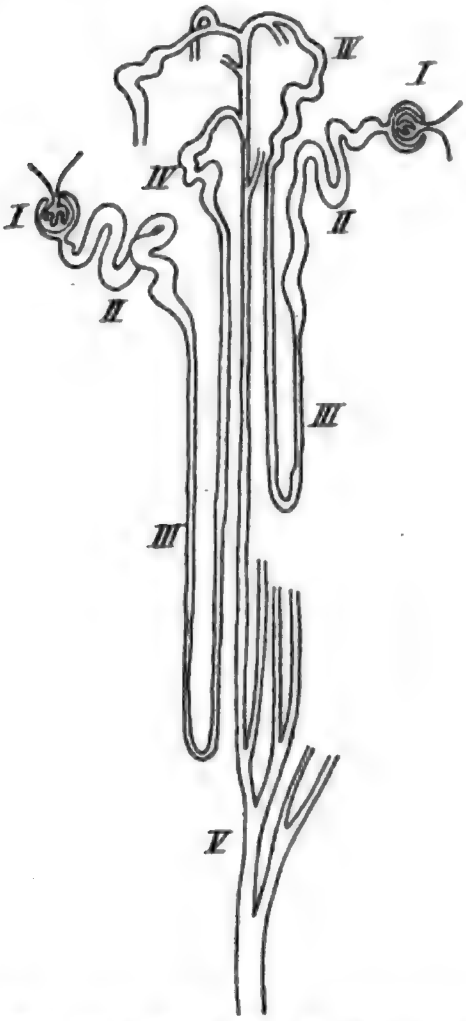


Fig. 29. Schema des Baues der Harnkanälchen in der Niere des Menschen. Aus C. Gegenbaur, Lehrbuch der Anatomie des Menschen, 1892. I bis V die einzelnen Abschnitte eines Harnkanälchens, und zwar: I Malpighisches Körperchen, II und IV gewundene Abschnitte, III Henlesche Schleife, V Sammelrohr.

gebildet und als Nierenbecken bezeichnet wird (Fig. 30). Die in das Nierenbecken hineinragenden papillenartigen Vorsprünge sind die Spitzen kegelartiger Gebilde, die mit breiter Basis der Rindensubstanz aufsitzen und im Inneren eben die Sammelkanäle enthalten. Die Kegel selbst pflegt man als Pyramiden zu bezeichnen, sie schließen zwischen sich Ausbuchtungen des Nierenbeckens ein, die man mit dem Namen der Nierenkelche (Calyces) belegt. Im einzelnen wechselt nun Zahl, Gestalt und Anordnung der Pyramiden ganz außerordentlich, und man kann danach eine Reihe sehr verschiedener Typen von Säugetiernieren unterscheiden. Im einfachsten Falle ist nur eine einzige solche Pyramide vorhanden, die alle Sammelkanäle aufnimmt und frei als einzige Papille in das Nierenbecken vorragt. So ist es bei Echidna und vielen kleineren Vertretern der Beuteltiere, Insektenfresser, Fledermäuse, Nagetiere und Edentaten. Bei einem zweiten Typus treten zu beiden Seiten dieser einzigen Papille Seitenwülste auf, wodurch das Nierenbecken verzweigt erscheint, so bei Känguruhs und vielen höheren Säugern. Bei einem dritten Typus tritt

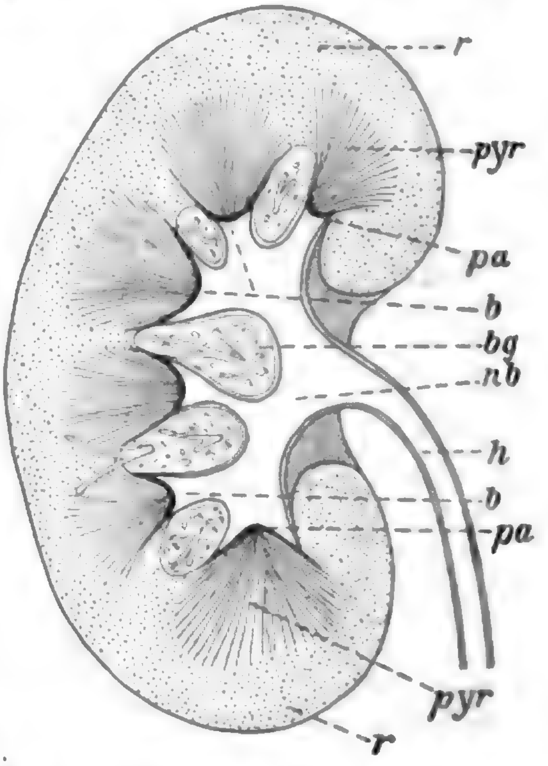


Fig. 30. Niere des Menschen im Frontalschnitt. Aus C. Gegenbaur, Lehrbuch der Anatomie des Menschen, 1892. b Nierenbecher, bg Blutgefäße, hl Harnleiter, nb Nierenbecken, pa Papillen, pyr Pyramiden der Marksubstanz, r Rindensubstanz.

an Stelle der mittleren Papille eine langgestreckte Leiste, die in ihrer ganzen Längenausdehnung die Mündungen der Nierenkanälchen trägt (Leistenniere). Eine solche Niere findet sich in reiner Form besonders bei Raubtieren, Paarhufern und Affen. Zu der Längsleiste können aber dann weiter ebenfalls noch Seitenwülste hinzutreten, die Leiste selbst kann gleichzeitig in mehrere hintereinander gelegene Papillen zerfallen. So auch in der Niere des Menschen (Fig. 30). — Ein gänzlich anderer Nierentypus entsteht dann, wenn jede Nierenpapille mit ihrem Kelch, Ureterast und Rindenmantel selbständig wird und so je ein besonderes Nieren-

Digitized by Google

läppchen (Renculus) darstellt. Die Niere erscheint dann oberflächlich gelappt, wird zu einer Renculiniere (Fig. 31), wie sie beispielsweise Bos unter den Huftieren, die Bären unter den Raubtieren und alle Wale zeigen. Ein letzter Nierentypus wird dann endlich durch die sogenannte Recessusniere dargestellt. Bei Pferd und Tapir tritt das eigentliche Nierenbecken ganz zurück, von ihm aus entwickelt sich dagegen nach vorn und hinten je ein langer Gang (Recessus), der tief in das Nierenparenchym einschneidet und ohne jede Papillenbildung die Mündungen der Sammelröhren empfängt. Bei Flußpferd und Elefant hat dieser Typus

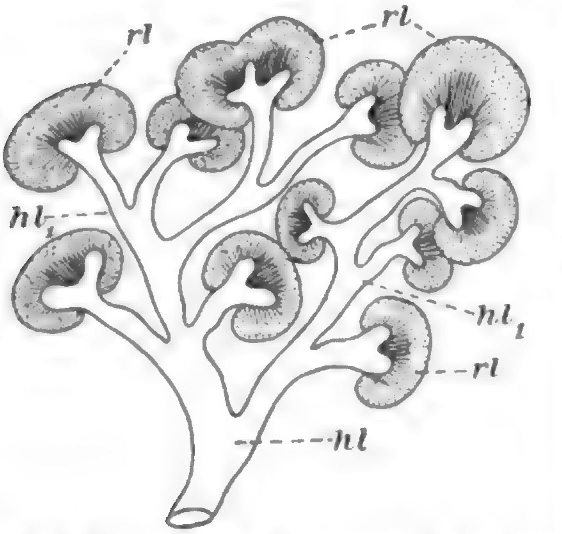


Fig. 31. Schema des Baues einer Renculiniere. Nach U. Gerhardt, Verhandl. d. Dtsch. Zoolog. Gesellsch. 1911. hl Harnleiter, hl_1 die Aeste desselben zu den einzelnen Renculi (rl).

insofern noch eine Weiterbildung erfahren, als hier 4 bis 5 Recessus auftreten, die auf der Nierenoberfläche dann ebenfalls Lappenbildung hervorrufen.

Die gesamte Nierensubstanz wird von der aus bindegewebigen Häuten bestehenden Nierenkapsel umschlossen. Am Hilus gehen aus den beiderseitigen Nierenbecken die eigentlichen Harnleiter (Ureteren) hervor, die frei die Bauchhöhle nach hinten durchziehen und sich schließlich in die hintere Wand der Harnblase einsenken. Sie sind innen von einem mehrschichtigen Epithel ausgekleidet, außen von Ring- und Längsmuskelfasern sowie von bindegewebigen Schichten umschlossen. — Alle Säugetiere besitzen eine Harnblase. Dieselbe geht im wesentlichen hervor aus der ventralen Kloakenwand, doch können an ihrer Bildung auch die unteren Abschnitte der ursprünglichen Harnleiter sowie Teile der Allantois (Allantoisstiel = Urachus) beteiligt sein. Nur bei den Monotremen münden die Ureteren nicht in die Harnblase ein, sondern unmittelbar in den Urogenitalkanal.

Der flüssige Harn enthält als wichtigsten Bestandteil den Harnstoff, daneben (nach Analysen des menschlichen Harns) noch schwefelhaltige Säuren, Kreatinin, Ammoniak, Hippursäure und ganz geringe Mengen von Harnsäure. Neben den Malpighischen Körperchen nehmen übrigens auch die Harnkanälchen tätigen Anteil an dem Exkretionsprozeß, und zwar hat man Grund zu der Annahme, daß in ersteren hauptsächlich Wasser und Salze, in letzteren besonders der Harnstoff abgeschieden wird.

7. Sonstige Nierenorgane von wechselnder morphologischer Bedeutung. 7a) Die Malpighischen Gefäße der Gliedertiere. Solche treten uns zunächst bei den Spinnentieren, vielfach neben den Coxaldrüsen, von den Skorpionen bis zu den Milben entgegen, und zwar handelt es sich hier um schlauchförmige Gebilde, die im Zusammenhange mit dem Endabschnitt des Mitteldarms stehen (Fig. 32 A). In der Regel sind sie in der Zwei- oder Vierzahl vorhanden, können sich aber im einzelnen mannigfach komplizieren, indem sie entweder

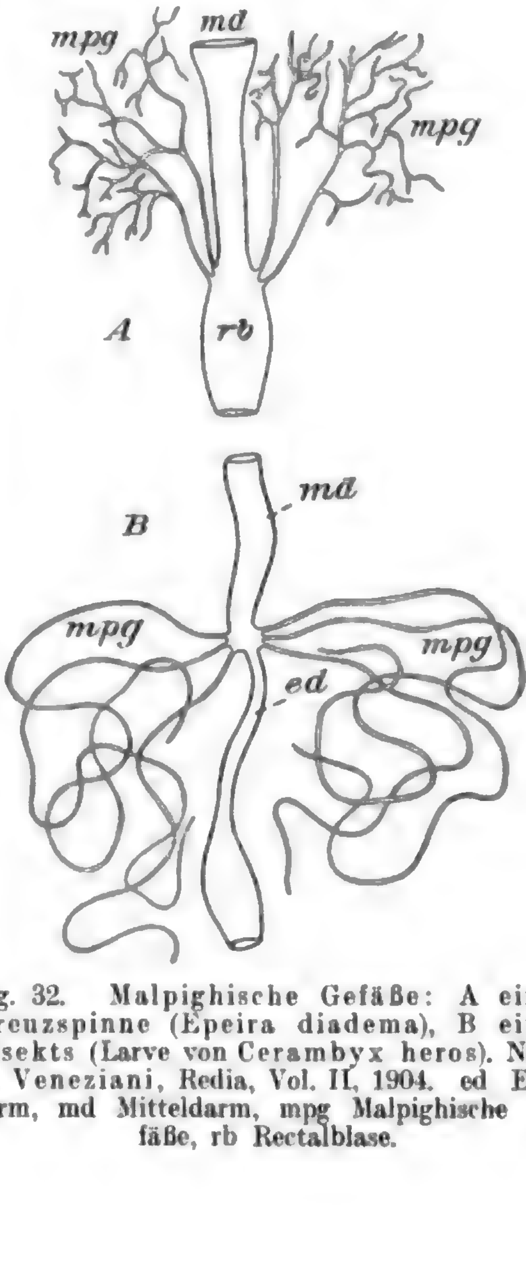


Fig. 32. Malpighische Gefäße: A einer Kreuzspinne (Epeira diadema), B eines Insekts (Larve von Cerambyx heros). Nach A. Veneziani, Redia, Vol. II, 1904. ed Enddarm, md Mitteldarm, mpg Malpighische Gefäße, rb Rectalblase.

Digitized by Google

an ihrer Mündungsstelle Knäuel bilden oder sich mit ihren Enden vielfach verzweigen. Histologisch besteht ihre Wandung aus flachen Epithelzellen, die von Exkretkörnern über und über erfüllt sind. Letztere werden direkt in das Lumen der Schläuche entleert und rufen, indem sie in größeren Massen daselbst sich anhäufen, nicht selten ein perlschnurartiges Aussehen der Schläuche hervor. Ihrer Entstehung nach sind sie in engsten Zusammenhang mit dem entodermalen Mitteldarm zu bringen und zwar im besonderen mit dem hintersten Abschnitt desselben, der häufig als Rektalblase auffällig hervortritt.

Malpighische Gefäße finden sich dann weiter unter den Gliedertieren bei Myriopoden und Insekten, hier aber als Anhangsgebilde des Enddarms (Fig. 32 B). Sie stellen auch hier langgestreckte, blind endende Drüsenschläuche dar, deren ursprüngliche Zahl ganz wie bei den Spinnen zwei oder vier beträgt. Ein solches Zahlenverhältnis ist anzutreffen bei den Tausendfüßen, bei den pentameren Käfern, bei Fliegen und wanzenartigen Insekten. Die Zahl der Malpighischen Gefäße kann dann aber steigen auf 6, 8, 12, 16 und so fort bis auf über hundert. Sechs Gefäße besitzen konstant die Schmetterlinge und Käfer, letztere mit Ausnahme der Pentameren, acht besitzen die Ohrwürmer und Lepisma, zwölf weist Machilis auf, sechzehn Campodea. Alle diese Insekten sind als oligonephridiale zu bezeichnen, ihre Gefäßzahl läßt sich stets auf eine Spaltung von 2 oder 4 Gefäßen zurückführen. Ihnen stehen gegenüber die polynephridialen Insekten (die meisten Gradflügler, die Hymenopteren), deren Gefäßzahl eine sehr viel höhere ist. Aber diese zahlreichen Gefäße münden nun nicht alle getrennt voneinander in den Darm ein, sondern sie ordnen sich zu einer beschränkten Zahl von Bündeln zusammen, die je einem besonderen, mit dem Darm in Verbindung stehenden Höcker aufsitzen. Die Zahl dieser Bündel ist nie höher als sechs, häufig sind es vier oder zwei, selten fünf oder drei, nur eines ist bei den Grillen vorhanden. Es entspricht also die Zahl der basalen Höcker ungefähr der Zahl der Gefäße der oligonephridialen Formen und es ist daher sehr wahrscheinlich, daß jeder Höcker tatsächlich einem basalen Gefäßstamm entspricht, der sich an seiner Spitze stark verzweigt hat. Sekundär können dann wieder Verschmelzungen mehrerer Bündel eintreten. Im allgemeinen darf ferner als Regel gelten, daß die Malpighischen Gefäße dort, wo sie in geringer Zahl auftreten, sehr lang sind. So können sie bei manchen Tausendfüßen mehrfache Körperlänge aufweisen, bei vielen Insekten unter vielfachen Windungen bis zum Magen emporziehen und wieder bis zum Enddarm zurückkehren. Sind Malpighische Gefäße dagegen in sehr großer Zahl vorhanden, so sind sie stets sehr kurz und bilden dem äußeren Aussehen nach Büschel dünner verworrener und geschlängelter Fäden.

Histologisch bestehen die Malpighischen Gefäße aus drei Schichten: erstens aus einer bindegewebigen äußeren Peritonealhülle, die durch elastische und muskulöse Fasern verstärkt sein kann, zweitens aus einer mittleren sehr zarten Tunica propria und drittens endlich aus einer inneren einschichtigen Lage hoch entwickelter Drüsenzellen von meist polygonaler Gestalt. Diese letzteren stellen die eigentlichen Exkretionszellen dar, ihr Plasma ist von gelblichen oder bräunlichen Körnchen erfüllt und trägt gegen das Lumen der Gefäße hin einen Bürstensaum. Der Inhalt der Gefäße besteht bald aus einer hellen Exkretflüssigkeit, bald aus zahllosen stark lichtbrechenden Kügelchen, welche die Gefäße häufig prall erfüllen und ihnen ein weißliches oder gelblichweißes Aussehen verleihen. Die Exkrete selbst bestehen ganz im allgemeinen aus Natrium-, Kalium-, Ammonium- und Calcium-Uraten, aus Calciumoxalaten und aus freier Harnsäure.

Es hat also hier der Darmtraktus die Funktion einer Niere übernommen, insofern er eben in seinem hinteren Abschnitt Divertikel zur Ausbildung bringt, die völlig im Dienste der Exkretion stehen. Die Zellen dieser Divertikel sind typische Nierenzellen geworden, die an ihrer äußeren Peripherie die im Blute gelösten Exkretstoffe aufnehmen, in ihrem Inneren verarbeiten und in das Gefäßlumen weitergeben. Von hier gelangen dann die endgültigen Abfallprodukte in den eigentlichen Darm und weiter nach außen. Ontogenetisch gehören die Divertikel bei den Insekten dem ektodermalen Enddarm (Proctodaeum) an und damit ergeben sich vom entwickelungsgeschichtlichen Standpunkt aus gewisse Schwierigkeiten für eine Homologisierung der Malpighischen Gefäße der Insekten mit denen der Spinnen, wo sie dem entodermalen Darmabschnitt ihren Ursprung verdanken. Aber freilich werden diese Schwierigkeiten leicht behoben, wenn man sich auf den Standpunkt stellt, daß homologe Organe eine Verschiebung ihres ontogenetischen Ursprungsortes durchmachen können.

7b) Das Exkretionsorgan der Nematoden. Dasselbe ist im einzelnen besonders genau bekannt von Ascaris lumbricoides (Fig. 33). Der Exkretionsapparat besteht hier zunächst aus zwei in den Seitenlinien verlaufenden, hinten blind endenden Kanälen, die sich vorn in einem Bogen vereinigen und mit einem kurzen unpaaren Kanal

Digitized by Google

in der ventralen Mittellinie des Körpers ausmünden. Das ganze paarige Kanalsystem besteht aus einer einzigen riesigen Zelle, deren Kern (k_2) auf der linken Seite liegt. In der Höhe dieses Kerns erleiden die

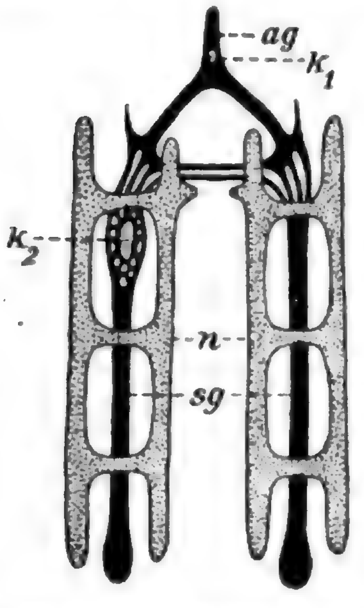


Fig. 33. Schema des Exkretionsapparates von Ascaris lumbricoides. Nach R. Goldschmidt, Zoolog. Anzeiger, 29. Bd., 1906. ag Ausführgang mit seinem Kern (k_1), n Exkretionsgewebe, sg Seitenkanal mit seinem Kern (k_2).

beiderseitigen Kanäle eine kapillare Auflösung und sind zudem durch zwei dünne Querbrücken miteinander verbunden. Auch der unpaare Ausführgang besteht aus einer einzigen Zelle. Dazu tritt nun noch das eigentliche exkretorisch tätige Drüsengewebe. Dasselbe liegt ebenfalls in den Seitenlinien und besteht aus einem Syncytium, welches zerstreute bläschenförmige Kerne enthält. In seiner Gesamtheit bildet es in jeder Seitenlinie zwei längsverlaufende, durch Querbrücken miteinander verbundene Stränge. Eine direkte Berührung mit der Wand der Nierenkanäle besteht nicht, die Ueberleitung der Exkrete erfolgt wahrscheinlich durch feine Fäden zwischen Drüsengewebe und Nierenkanal.

7c) Die Exkretionsorgane bei den Echinodermen. Besondere typische Exkretionsorgane fehlen allen Echinodermen. Zum Teil erfolgt die Abscheidung flüssiger Exkrete durch Osmose an den atmenden Flächen des Körpers, ferner hat man als Exkretprodukte wohl anzusehen die gefärbten, zuweilen kristallinischen Körnchen, welche in den verschiedensten Körperteilen, zumal den bindegewebigen Schichten, angetroffen werden und während der ganzen Lebensdauer des Tieres hier aufgespeichert liegen bleiben. Aehnliche geformte Produkte enthalten die frei in der Leibeshöhle flottierenden Wanderzellen. Außerdem hat man noch zahlreichen anderen Organen der Echinodermen exkretorische Funktion zugeschrieben, so dem Axialorgan der Seeigel, den sackförmigen Bursae der Schlangensterne, den Tiedemannschen Körperchen der Seesterne, den Wimpertrichtern an der Leibeshöhlenwand der Holothurien.

7d) Die Nephrocyten der Gliedertiere. Man versteht darunter große, isolierte oder in Gruppen vereinigte Zellen, die im Inneren der verschiedensten Körperteile auftreten können und ihre exkretorische Funktion besonders klar dadurch beweisen, daß sie überall dem Körper eingefügtes karminsaures Ammon aufnehmen. Sie treten bei Krebsen bald in Kopf, Thorax oder Abdomen, bald in den Füßen oder den Kiemenanhängen auf, sie finden sich bei Spinnen im ganzen Körper zerstreut und häufen sich bei Insekten namentlich in der Umgebung des Herzschlauches an.

7e) Die Exkretionsorgane bei den Tunicaten. Dieselben treten uns hier in einer durchaus eigenartigen Form und Entwickelung entgegen, welche von einfachen Mesenchymzellen zu hoch komplizierten Organen führt. Bei den Botrylliden liegen die Verhältnisse am primitivsten, insofern hier zu ovalen Zellelementen umgewandelte Mesenchymzellen aus der Leibeshöhlenflüssigkeit die Harnsalze aufnehmen und in ihrem Protoplasma in Form bräunlich glänzender Körnchen niederlegen. Bei den Synascidien schließen sich diese allenthalben zerstreuten Mesenchymzellen dann enger zusammen zu einer einheitlichen mesodermalen Zellgruppe von gelblichgrauer Färbung, und bei den eigentlichen Ascidien gehen aus diesem Zusammenschlusse allseitig geschlossene Bläschen hervor, die in ein das Darmrohr umkleidendes Bindegewebspolster eingebettet sind. Die Wand der Bläschen besteht aus einem einschichtigen vakuolisierten Nierenepithel, das fortgesetzt die Exkretstoffe dem Blute entnimmt und im Inneren der Bläschen als Harnkonkremente anhäuft. Bei den Cynthiadeen sind diese Bläschen zu sack- oder schlauchförmigen Gebilden von häufig bedeutendem Umfang geworden, sie liegen nicht mehr in dem den Darm umschließenden Bindegewebe, sondern peripher dicht unter dem äußeren Körperepithel zu beiden Seiten des Körpers. Bei den Molguliden hat das Exkretionsorgan dann seine höchste Ausbildungsstufe erreicht. Es stellt hier ein umfangreiches, dicht unter der Körperoberfläche gelegenes Gebilde dar, das man früher vielfach als Bojanussches Organ bezeichnet und (mit Unrecht) mit dem entsprechenden Organ der Muscheln verglichen hat. In Wirklichkeit ist es aus einer Vereinigung der Nierenbläschen der anderen Tunicaten entstanden zu denken und erscheint nun äußerlich als ein bohnenförmiger Nierenkörper, der außen von einer derben bindegewebigen Membran umschlossen wird und innen mit hohen schmalen Drüsenzellen ausgekleidet ist. Die in das innere Lumen

Digitized by Google

abgestoßenen Exkretstoffe vereinigen sich zu einem eigenartigen stabförmigen Gebilde von gelb- bis dunkelbräunlicher Färbung.

Recht kompliziert verhalten sich dann endlich auch die Exkretionsorgane der Salpen. Auch hier treten zunächst Mesenchymzellen von exkretorischer Funktion auf, aber diese lagern sich weiterhin in Masse besonderen Nierenorganen auf, von denen sie absorbiert werden. Von solchen Nierenorganen sind drei Paare vorhanden, die als blasenförmige Blindsäcke in Speiseröhre und Magen sich öffnen. Ihr Epithel nimmt die Exkretstoffe aus dem Blut sowie aus den Mesenchymzellen auf und scheidet sie in das Lumen der Nierenorgane wieder aus. Die weitere Ableitung nach außen erfolgt dann durch Darm und Kloake.

Den Appendikularien fehlt jegliches Nierenorgan.

7f) Höhere Tierformen ohne besondere Exkretionsorgane. Es fehlen Exkretionsorgane völlig den Gordiiden, den Chätognathen sowie den Enteropneusten, bei welch letzteren man ohne genügenden Grund den Eichel- und Kragenpforten exkretorische Funktion zugeschrieben hat. Unter den ektoprokten Bryozoen fehlt ferner ein Exkretionsorgan durchaus den Gymnolaemata, wo das als Nierenorgan in Anspruch genommene sogenannte Intertentakularorgan in Wirklichkeit einen Eileiter darstellt. Bei den Phylactolaemata besitzen einige Formen ebenfalls kein Exkretionsorgan, bei anderen scheint sich an den Verbindungskanälen der Lophophorhöhle mit den Tentakelhöhlen ein solches von durchaus eigenartigem Aufbau herauszubilden.

Literatur. **F. M. Balfour,** *The anatomy and development of Peripatus capensis. Quart. Journ. microsc. science. N. S. vol. 23, 1883.* — **H. M. Bernard,** *The coxal glands of Scorpio. Ann. Mag. Nat. Hist. 6. ser. vol. XII, 1893.* — **F. Blochmann,** *Untersuchungen über den Bau der Brachiopoden. Jena 1892.* — **L. Bruntz,** *Contribution à l'étude de l'excrétion chez les Arthropodes. Archives de Biologie. t. 20, 1904.* — **W. Dahlgrün,** *Untersuchungen über den Bau der Exkretionsorgane der Tunicaten. Arch. mikrosk. Anat. 58. Bd., 1901.* — **L. Fage,** *Recherches sur les organes segmentaires des Annélides polychètes. Ann. Scienc. nat. Zool. (9. ser.) vol. 3, 1906.* — **V. Faussek,** *Zur Anatomie und Embryologie der Phalangiden. Biolog. Zentralbl. 12. Bd., 1892.* — **Felix und Bühler,** *Die Entwickelung der Harn- und Geschlechtsorgane in O. Hertwigs Handbuch der vergl. u. experim. Entwickelungslehre der Wirbeltiere. 3. Bd., 1. Teil, 1906.* — **H. Gadow,** *Vögel in Bronns Klassen und Ordnungen des Tierreichs. VI. Bd., 4. Abt. Leipzig 1891.* — **C. Gegenbaur,** *Vergleichende Anatomie der Wirbeltiere. 2. Bd., 1901.* — **U. Gerhardt,** *Zur Morphologie der Säugetierniere. Verhandl. d. Dtsch. Zoolog. Gesellsch. 1911.* — **R. Goldschmidt,** *Mitteilungen zur Histologie von Ascaris. Zoolog. Anzeiger 29. Bd., 1906.* — **E. S. Goodrich,** *On the nephridia of the Polychaeta. Quart. Journ. microsc. Sc. N. S. vol. 40, 41, 43, 1897 bis 1900.* — **Derselbe,** *On the structure of the excretory organs of Amphioxus. Quart. Journ. microsc. Sc. N. S. vol. 45, 1902.* — **L. von Graff,** *Turbellaria in Bronns Kl. u. Ord. Leipzig 1905.* — **C. Grobben,** *Die Antennendrüse der Crustaceen. Arb. Zool. Inst. Wien. Bd. 3, 1880.* — **Derselbe,** *Morphologische Studien über den Harn- und Geschlechtsapparat sowie die Leibeshöhle der Cephalopoden. Arbeit. Zool. Inst. Wien. Bd. 5, 1884.* — **C. K. Hoffmann,** *Reptilien in Bronns Kl. u. Ordn. VI. Bd., 3. Abt., 1890.* — **A. Lang,** *Lehrbuch der vergleichenden Anatomie der wirbellosen Tiere. 1. und 2. Auflage.* — **R. Loeser,** *Beiträge zur Kenntnis der Wimperorgane (Wimpertrichter) der Hirudineen. Zeitschr. wissensch. Zool. 93. Bd., 1909.* — **P. Marchal,** *Recherches anatomiques et physiologiques sur l'appareil excréteur des Crustacés Décapodes. Arch. Zool. expér. et génér. (2. sér.) tome 10, 1892.* — **J. Meisenheimer,** *Die Exkretionsorgane der wirbellosen Tiere. I. Protonephridien und typische Segmentalorgane. Ergebnisse und Fortschritte der Zoologie. 2. Bd., 1909. Enthält ausführliches Literaturverzeichnis, besonders für die Würmer.* — **Th. H. Montgomery,** *On the morphology of the excretory organs of Metazoa: a critical review. Proceed. Americ. Philosoph. Soc. vol. 47, 1908. Enthält ausführliches Literaturverzeichnis.* — **W. Patten and A. P. Hazen,** *The development of the coxal gland, branchial cartilages, and genital ducts of Limulus polyphemus. Journ. of Morphol. vol. 16, 1900.* — **W. M. Rankin.** *Ueber das Bojanussche Organ der Teichmuschel. Jen. Zeitschr. Naturwiss. 24. Bd., 1890.* — **W. Schimkewitsch,** *Lehrbuch der vergleichenden Anatomie der Wirbeltiere, 1910.* — **E. Schindler,** *Beiträge zur Kenntnis der Malpighischen Gefäße der Insekten. Zeitschr. wiss. Zool. 30. Bd., 1878.* — **K. Schulz,** *Untersuchungen über den Bau der Bryozoen. Arch. Naturgesch. 67. Jahrg., 1. Bd., 1901.* — **A. Sedgwick,** *The development of the Cape species of Peripatus. pt. III, IV. Quart. Journ. microsc. science. N. S. vol. 27, 28, 1887.* — **H. Simroth,** *Gastropoda prosobranchia in Bronns Kl. u. Ordn. 3. Bd. Mollusca. 2. Abt., 1896 bis 1907.* — **R. Sturany,** *Die Coxaldrüsen der Arachnoideen. Arb. Zool. Inst. Wien. Bd. IX, 1891.* — **A. Ter-Poghossian,** *Beiträge zur Kenntnis der Exkretionsorgane der Isopoden. Zeitschr. Naturwiss. (Halle) 81. Bd., 1909.* — **F. Todaro,** *Sur les organes excréteurs des Salpides. Arch. Ital. Biol. tome 38, 1902.* — **F. Vejdovsky,** *Zur Morphologie der Antennen- und Schalendrüse der Crustaceen. Zeitschr. wiss. Zool. 69. Bd., 1901.* — **A. Veneziani,** *Valore morfologico e fisiologico dei Tubi Malpighiani. Redia. vol. 2. Firenze 1904.* — **M. Weber,** *Die Säugetiere. Jena 1904.* — **R. Wiedersheim,** *Vergleichende Anatomie der Wirbeltiere.*

J. Meisenheimer.

Digitized by Google

Experimentelle Morphologie der Tiere und Pflanzen

siehe den Artikel „Entwickelungsmechanik oder Entwickelungsphysiologie der Tiere und der Pflanzen".

Experimentelle Psychologie

siehe den Artikel „Psychologie, Experimentelle Psychologie".

Explantation.

1. Allgemeines (Begriff, Bedeutung, Entstehung). 2. Technik der Explantation. 3. Resultate und Ziele der Explantation. 4. Grenzgebiete.

1. Allgemeines (Begriff, Bedeutung, Entstehung). Der bezeichnende Name Explantation stammt von W. Roux (zuerst angewendet in dessen Vortrag I über Entwickelungsmechanik. Leipzig, 1905). Oppel hat vorgeschlagen, unter Explantation (Auspflanzung) nur solche Experimente zu verstehen, bei welchen die dem Organismus entnommenen Teile (Gewebsstücke, Organe, Organteile) in ein Medium verbracht werden, welches (ohne selbst ein Organismus zu sein) das Fortleben des explantierten Gewebes ermöglicht. Andere übliche Namen sind: In vitro Kultur, Deckglaskultur usw.

Die Möglichkeit der Explantation beruht auf dem schon seit alter Zeit bekannten Umstande, daß Teile des Organismus noch Lebensäußerungen zeigen können, wenn sie vom Organismus abgetrennt sind oder auch im Zusammenhang mit dem Organismus nach dessen Tod. Peristaltik des Darmes, Fortdauer des Herzschlages, Muskelkontraktionen verschiedenster Art in abgetrennten Körperteilen sind längst bekannte hierhergehörige Erscheinungen und sind vielfach Gegenstand wissenschaftlicher Untersuchung geworden. Zahlreiche Physiologen seit C. Ludwig bis Tigerstedt und Abderhalden haben an solchen Explantaten die Stoffwechselvorgänge der explantierten Organe untersucht und Locke gelang es, ein Kaninchenherz (Kuliabko sogar nach zweitägiger Aufbewahrung im Eisschrank) durch Durchleitung von erwärmter und mit Sauerstoff gesättigter Ringerscher Lösung wieder zu beleben und mehrere Stunden in Tätigkeit zu erhalten.

Unter dem Mikroskop können Lebenserscheinungen nicht nur bei Pflanzen, sondern auch bei Tieren, sogar an Säugetiergeweben, im Explantat wahrgenommen werden, wenn man, wie es durch M. Schultze mit seinem heizbaren Objekttische geschah, dem Explantat die Körpertemperatur gewährt, und dasselbe zugleich in einem geeigneten Medium untersucht (v. Recklinghausen, Bizzozero und zahlreiche andere Forscher). Schon aus diesen Untersuchungen ergab es sich, daß neben der für Warmblüter und Wechselwarme verschiedenen Temperatur die Aufrechterhaltung der Sauerstoffatmung im Explantat ein wichtiges Erfordernis darstellt, wozu bei längerer Dauer noch geeignete Ernährung kommen muß. Solche mikroskopische Explantation ist von großer Bedeutung, weil sie gestattet, die Lebensäußerungen der Gewebe und Zellen direkt zu sehen und experimentell zu beeinflussen, wobei Regulationen von Seiten des Organismus ausgeschlossen sind (Oppel).

W. Roux, welcher schon 1893 mit prinzipiell derselben Methode arbeitete, als er die Anziehung und Selbstordnung isolierter Furchungszellen in filtriertem Hühnereiweiß entdeckte, hat uns als erster gezeigt, welche Resultate sich mit der Explantation erreichen lassen, wenn ihrer Anwendung kausal-analytisches Denken in seinem Sinne vorangeht. Er entdeckte so die direkten Näherungswirkungen, welche viele dieser isolierten Zellen aufeinander ausüben, das von ihm als „Cytotropismus" bezeichnete Geschehen, sowie die Zellvereinigung, die Zellverschiebung und die Zellenselbsttrennung.

Es folgten Versuche von Born (1894), der Amphibienembryonen in kleine Stücke zerschnitt und fand, daß dieselben in der von Roux benützten Flüssigkeit trotzdem weiterleben und sich fortentwickeln konnten, sobald die äußere Haut (das Ektoderm) das Stückchen überwächst und nach außen abschließt. Von Driesch, Herbst, Boveri, Wilson, Maas, Morgan und anderen Forschern wurde die Explantation in verschiedene Medien vielfach bei wirbellosen Tieren zur Isolation embryonaler Teile und zur Erforschung ihrer Funktion bei der Bildung des Organismus mit Erfolg benützt.

Neuerdings wurden Explantationsversuche von zahlreichen amerikanischen Forschern mit ausgezeichnetem Erfolge vorgenommen, vor allem durch Harrison, dem Burrows, Carrel, Lambert, Hanes, Lewis, Whorter, Whiple, L. Loeb, Weil und andere folgten und die Versuche wiederholt auch auf Säugetiere und den Menschen ausdehnten.

In Deutschland, das zurzeit hierin unter weniger günstigen Verhältnissen arbeitet als Amerika mit seinen glänzend ausgestatteten Instituten, haben auch in neuerer Zeit einige jüngere Forscher, Braus, Hadda, Oppel, Explantationsversuche gemacht und in Frankreich Jolly, Bra und andere Autoren.

2. Technik der Explantation. Als bestes Medium hat sich das Blutplasma desselben Tieres erwiesen. Dasselbe wird aus, unter aseptischen Kautelen der Ader oder dem Herzen des Versuchstieres vermittels eines geölten Glasröhrchens entnommenem, bei 0° sofort zentrifugiertem Blute gewonnen. Die am besten schon zuvor (in Narkose) dem Tiere entnommenen auf sterilisirte Uhrschalen, Objektträger, Deckgläser usw. gebrachten Gewebsstückchen, werden mit Plasma bedeckt, das sofort gerinnt, und in feuchter Kammer unter einem im Thermostat bei Körpertemperatur stehenden Mikroskop untersucht. Größere Präparate, z. B. Stücke, der Cornea, der Trachealschleimhaut oder der Haut werden in Uhrschalen mit reichlichem Plasma, kleinste mit feinen Messern und Nadeln isolierte Gewebsstückchen in einem Tropfen

Plasma als Deckglaspräparat untersucht. Für Sauerstoffzufuhr ist durch geeignete Apparate zu sorgen. Anstatt Blutplasma wurden auch mit Wasser verdünntes Blutplasma, Blutplasma anderer Spezies, Blutserum, Lymphe, Ringersche (Lockesche) Lösung eventuell mit Dextrosezusatz und andere Medien verwandt. Mikroskopische Beobachtungen können am lebenden Explantat selbst angestellt und eventuell durch die photographische Platte festgehalten werden; es können aber auch explantierte Gewebsstückchen in verschiedenen Intervallen nach den Regeln der mikroskopischen Technik fixiert, geschnitten, gefärbt, eingeschlossen und untersucht werden.

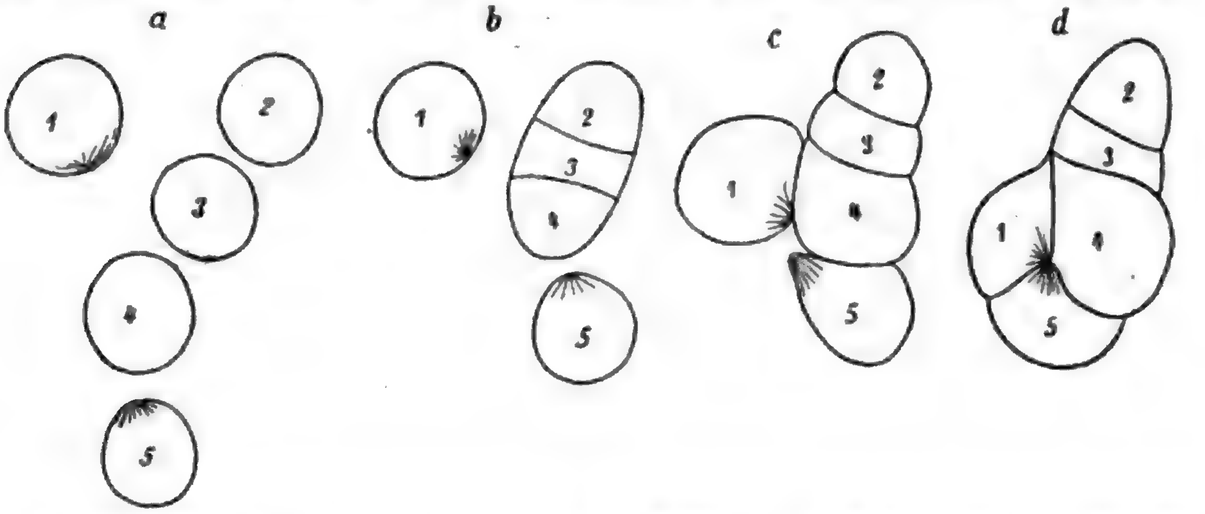


Fig. 1. Bewegung von Furchungszellen im Explantat. Die Figur zeigt die von Roux im Explantat beobachtete Selbstordnung von 5 Furchungszellen (1 bis 5), zuerst deren gegenseitige Näherung, besonders stark die von Zelle 1 gegen 5. Nach der flächenhaften Vereinigung fanden noch weitere Umordnungen statt, die im Original (Archiv für Entwickelungsmechanik der Organismen, Bd. 3) einzusehen sind.

3. **Resultate und Ziele der Explantation.** Die Explantation hat uns zum Teil schon ermöglicht und wird uns ferner ermöglichen, die Lebensäußerungen im Sinne Rouxs, also vor allem die Selbstveränderung (Dissimilation), die Selbstwiederbildung (Assimilation), die Selbstaufspeicherung, das Selbstwachstum, die Selbstbewegung, die Selbstteilung, Selbstgestaltung (also Selbstentwickelung), Vererbung und Selbstregulation in allen diesen Leistungen zu erforschen, indem wir dem Organismus entnommene Teile lebend erhalten und außerhalb des Organismus experimentell untersuchen.

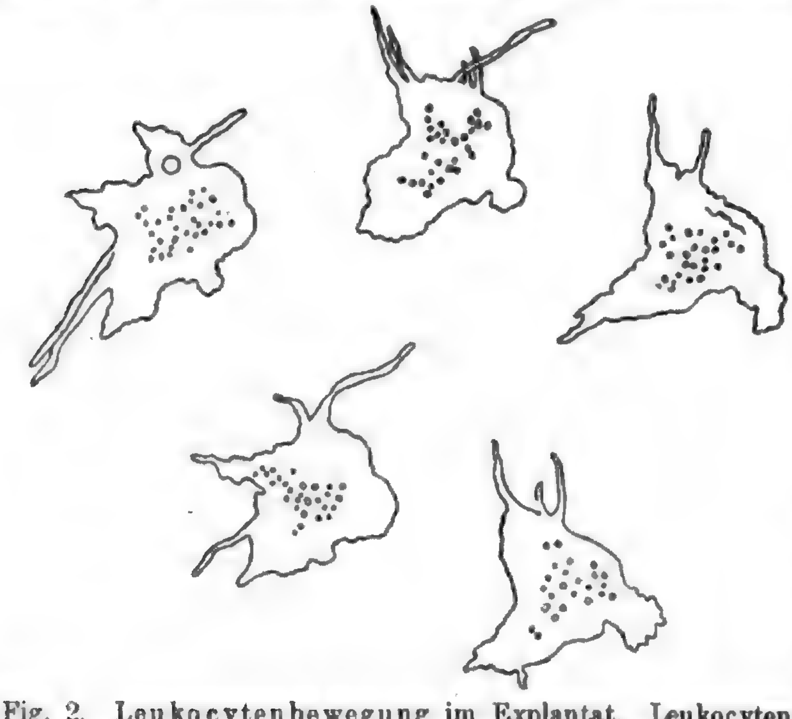


Fig. 2. Leukocytenbewegung im Explantat. Leukocyten von Triton cristatus nach 5 Monate dauernder Explantation eines Bluttropfens im zugeschmolzenen Glasrohr im Eisschrank. Die Bewegung tritt nach Verbringen des Explantats in Zimmertemperatur ein. 5 Stadien in Intervallen von je 1 Minute. Nach Jolly.

Als Beispiele durch Explantation erforschten Gestaltungs- und Erhaltungsgeschehens bei Wirbeltieren gebe ich in den Abbildungen Figur 1 bis 16 Darstellungen von drei wichtigen am Explantate beobachteten Lebensäußerungen, der Selbstbewegung, dem Selbstwachstum und der Selbstteilung wieder. Figur 1 zeigt die Bewegung von Furchungzellen, Figur 2 die Leukozytenbewegung mit Pseudopodienbildung beim Triton nach 5 Monate dauernder Explantation, Figur 3 bis 6 die Epithelbewegung in der explantierten Horn-

haut (Cornea) vom Hunde (Figur 3 und 4 sind nach Schnittpräparaten wiedergegeben, Figur 5 und 6 entsprechen direkt nach dem lebenden Explantat gezeichneten Ober-

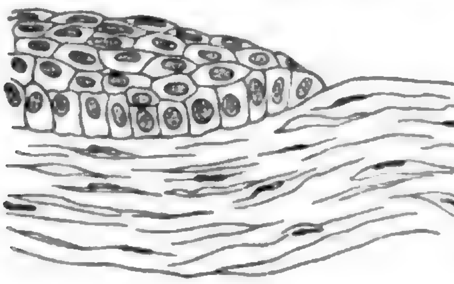


Fig. 3.

Fig. 4.

Fig. 3 u. 4. Epithelbewegung im Explantat. Nach Oppel.

Fig. 3. Schnitt durch eine frische Hornhaut vom Hunde, von deren Oberfläche (rechts vom Beschauer) das Epithel abgeschabt wurde.

Fig. 4. Ebenso wie Fig. 3 behandelte Hornhaut nach 24stündiger Explantation. Die in Figur 1 höheren Epithelzellen sind niedrig (platt) geworden und auf den Defekt ausgewandert.

flächenbildern), Figur 7 bis 9 Zellbewegungen von Geschwulstzellen eines explantierten Rattensarkoms, Figur 10 bis 12 Wachstumserscheinungen einer explantierten Nervenzellgruppe vom Frosch, Figur 13 und 14 Zellteilungsfiguren aus dem explantierten Knochenmark von Frosch und Meerschwein und Figur 15 und 16 mitotische Kernteilungsfiguren aus der explantierten Milz und dem Knochenmark der Katze.

Fast bei keiner Gewebsart wurde Wachstum vermißt, den explantierten Geweben wurde lange, mehrere Wochen anhaltende Lebensdauer zugeschrieben, es wurde zum Teil riesenhaftes Wachstum des Explantats

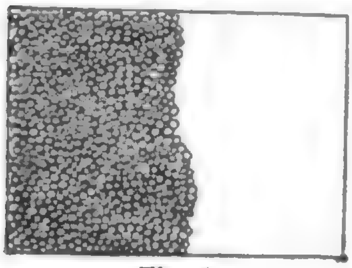


Fig. 5.

Fig. 5. Stück einer frischen halbabgeschabten Hornhaut der Katze.

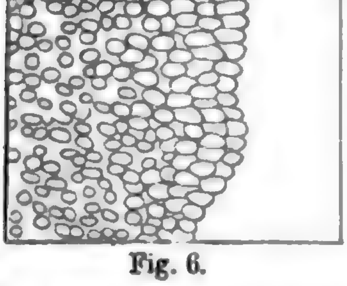


Fig. 6.

Fig. 6. Dieselbe Hornhaut nach 6stündiger Explantation. Die Epithelzellen haben begonnen den Defekt zu überkleiden.

Fig. 5 u. 6. Epithelbewegung direkt im lebenden Explantat unter dem Mikroskop gesehen. Nach Oppel.

Fig. 7.

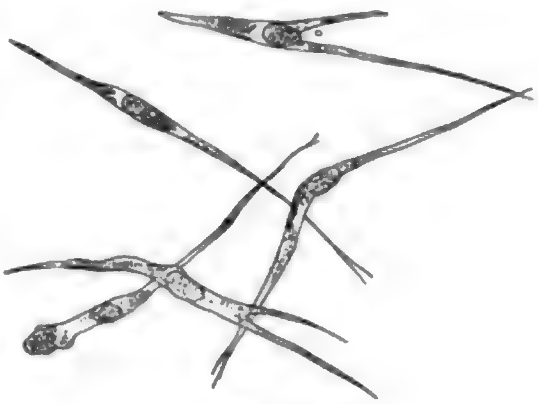


Fig. 8.

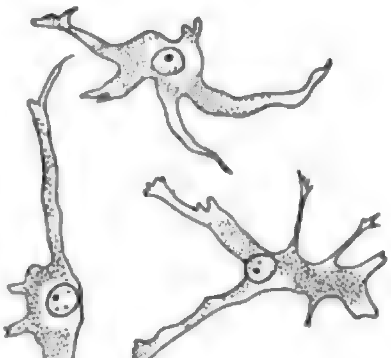


Fig. 9.

Fig. 7 bis 9. Zellbewegung von Geschwulstzellen in einer explantierten Geschwulst der Ratte (Sarkom). Nach Lambert und Hanes. Fig. 7 bei schwacher, Fig. 8 und 9 bei stärkerer Vergrößerung.

gefunden und es gelang die im Wärmofen gezüchteten Explantate wiederholt in frische Medien weiter zu verpflanzen, also etwa nach Art von Bakterienkulturen. Letztere Angaben bedürfen allerdings zum Teil noch der Bestätigung und es sind manche der zum Teil unwahrscheinlich klingenden Deutungen Carrels über Wachstumserscheinungen an Geweben erwachsener Säuge-

Digitized by Google

tiere von deutscher Seite auf das richtige Maß zurückgeführt worden unter voller Würdigung des Tatsächlichen. Es wurde von Hadda, Pfeiffer, Hürthle, Praus- genommener Bilder haben auch passive Zellbewegungen mitgewirkt.

In ausgedehnterem Maße konnten die Ergebnisse von Harrison über Nerven-

Fig. 10.

Fig. 11.

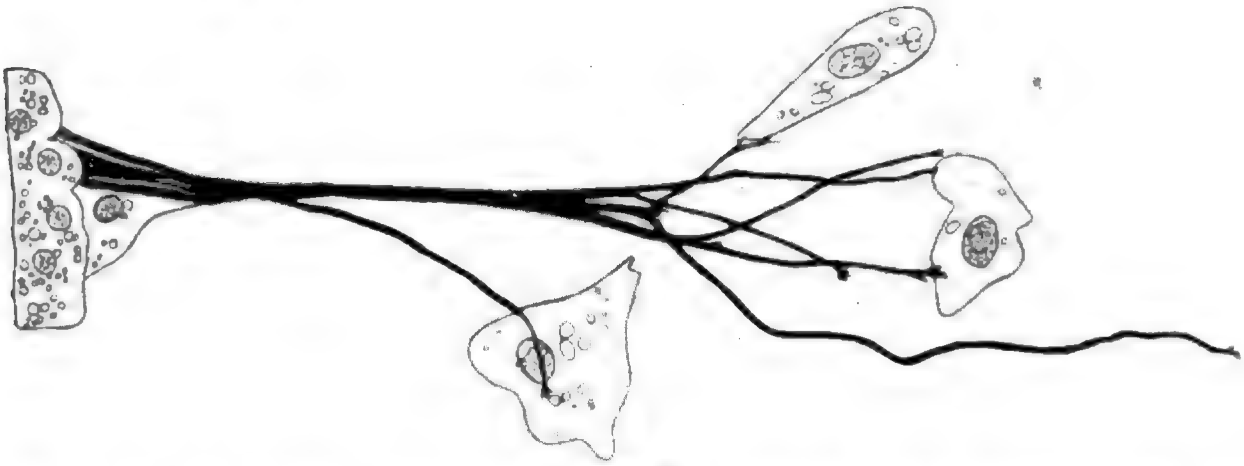


Fig. 12.

Fig. 10 bis 12. Wachstum im Explantat. Nach Harrison. Drei Zeichnungen ein und derselben Nervenzellengruppe einer Froschlarve explantiert in Froschlymphe nach 24 (Fig. 10), 36 (Fig. 11) und 46½ (Fig. 12) Stunden.

nitz, Ponfick, Oppel besonders die Frage geprüft, ob es sich in den Carrelschen Kulturen um wirkliches Zellenwachstum handelt. Oppel unterscheidet nach Roux: 1. Massenwachstum, das ist die Vermehrung der spezifisch strukturierten organischen Substanz diese beruht also auf seiner „morphologischen“ und eventuell chemischen Assimilation; 2. Rein dimensionales Wachstum, das ist Vergrößerung ohne Vermehrung der organisierten Substanz. Rein ein- und zweidimensionales Wachstum geschieht einfach durch bloße Umordnung von Teilen, meist von Zellen; das dreidimensionale Wachstum geschieht durch Aufnahme nicht organisierter Substanz, wie Wasser (Luft bei Pflanzen) in das Gewebe.

Alle diese Wachstumsarten lassen sich nach Oppel im Explantat beobachten und zum Teil experimentell erzeugen, doch überwiegen vielfach die Erscheinungen des rein dimensionalen Wachstums, vor allem die aktive Zellbewegung, (wie auch im wachsenden Organismus) quantitativ über die Erscheinungen des Massenwachstums und bei der Entstehung vieler von Carrel und anderen Autoren als Wachstum in Anspruch wachstum bei Embryonen (s. Fig. 10 bis 12) durch Braus bestätigt werden. Auch konnte letzterer die Wege weiter verfolgen, welche die Nerven in Deckglaskulturen einzuschlagen vermögen, und er hat die autochthone Entstehung der spezifischen Nervenbahnen festgestellt, welche schon in der Extremitätenknospe des Embryos dem Nervenfortsatz einen bestimmten Weg zuweist. L. Loeb und Harrison haben neuerdings durch Explantation nachgewiesen, daß nicht nur die Berührung mit einem festen Körper die notwendige Vorbedingung für die aktive Bewegung ist (Stereotropismus), sondern daß auch die Form dieses Körpers die Richtung der Bewegung sowie die Form und Anordnung der Zellen beeinflußt. W. und M. Lewis verfolgten den Zusammenschluß von Zellen verschiedener Gewebe (Membranbildung) im Explantat.

Von französischer Seite liegen Kulturversuche von Ranvier, Bra (mit Krebszellen) und Beobachtungen von Jolly vor, der Leukocytenbewegungen nach 10 bis 15 monatlicher Explantation (in zugeschmolzenen Glasröhrchen bei 0⁰) im Froschblute sah (s. Fig. 2), sowie schon vor

Digitized by Google

mehreren Jahren Zellvermehrungen im Explantat vom Säugetier und Frosch (s. Fig. 13 und 14).

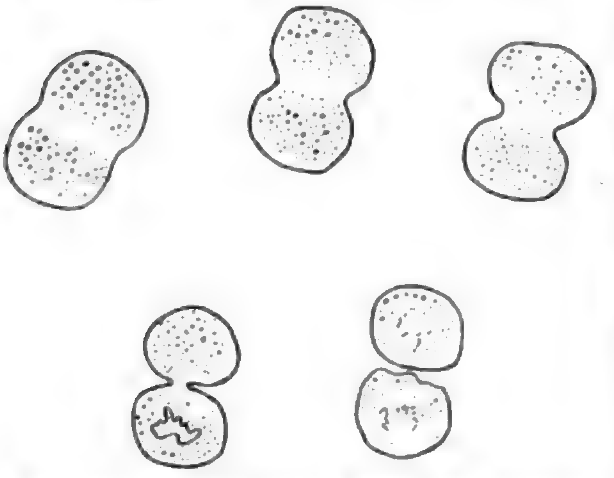


Fig. 13. Zellteilungsfiguren im Explantat vom Knochenmark des Frosches. Nach Jolly.

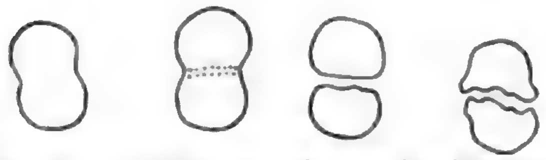


Fig. 14. Zellteilungsfiguren im Explantat vom Knochenmark des Meerschweinchens. Nach Jolly.

Oppel bildete im Explantat entstandene mitotische Kernteilungsfiguren (siehe Fig. 15 und 16) verschiedener Säugetiergewebe ab, konnte im Explantat zu Wundheilung führende Bewegungen der Epithelzellen bei Säugetieren experimentell hervorrufen (siehe Fig. 3 und 4) und unter dem Mikroskop am lebenden Explantat direkt sehen (siehe Fig. 5 und 6). Er erkannte auch mit Hilfe der Explantation die von ihm von der Leukocytenbewegung unterschiedene Epithelbewegung als einen wichtigen Faktor beim Gestaltungs- und Erhaltungsgeschehen. Nach Oppel kommt die auf Lebenseigenschaften des Protoplasmas beruhende Möglichkeit der aktiven Bewegung weit zahlreicheren Zellen auch des erwachsenen Metazoenkörpers zu, als bisher angenommen wurde und es bestehen nach L. Loeb und Oppel Unterschiede in der Bewegungsart der verschiedenen Zellarten.

Auch für pathologisches Geschehen ergab die Explantation Resultate. Neben den bereits erwähnten Bewegungs- und Wachstumserscheinungen pathologischer Neubildungen (Karzinom-, Sarkom und andere Geschwulstzellen, s. Fig. 7 bis 9) konnte beobachtet werden, daß Geschwulstkeime, die außerhalb des Organismus gewachsen waren, sich (z. B. bei Ratten) von geringerer Giftigkeit erwiesen. Ferner ergaben sich wichtige Unterschiede im Wachstum bei verschiedener Beschaffenheit des Mediums, so z. B. wenn die Geschwulstkeime im Plasma anderer Tierspezies gezüchtet wurden. Es blieb z. B. Rattensarkom länger am Leben im Blutplasma der Maus und des Meerschweinchens als im Blutplasma vom Hund. Wurden gewisse Fremdkörper (z. B. Lycopodiumsporen) der Kultur von Teilen des Hühnerembryo beigefügt, so kam es zur Riesenzellenbildung.

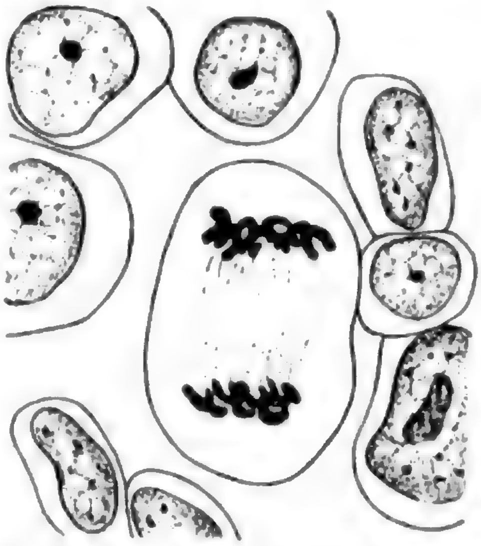


Fig. 15. Zell- und Kernteilung im Explantat. Mitose aus der explantierten Milz der Katze. Nach Oppel.

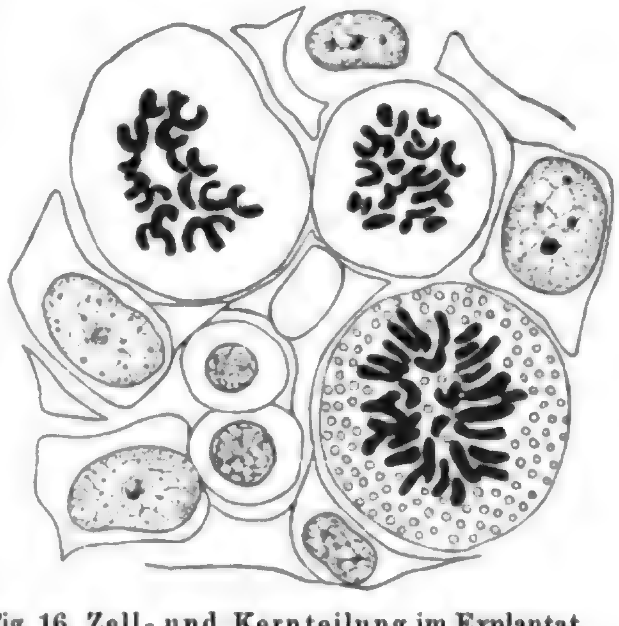


Fig. 16. Zell- und Kernteilung im Explantat. Mitosen aus dem explantierten Knochenmark der Katze. Nach Oppel.

4. Grenzgebiete der Explantation. Indem die Explantation zeigte, daß nicht nur Eiern, Spermatozoen, Sporen usw., wie schon länger bekannt, sondern zahlreichen weiteren Zellen und Geweben ein Leben außerhalb des Organismus, eine vita propria, zukommt, tritt sie in Beziehung zur Individualitätslehre von Zellen und Personen. Von der Transplantation,

Digitized by Google

sei sie **Implantation** („funktionelle" Transplantation, Roux) oder **Interplantation** (funktionelle Substitution, Oppel), unterscheidet sich die Explantation dadurch, daß das Explantat in keiner Verbindung mit einem Organismus steht. Versuche von P. Ehrlich, Michaelis, O. Hertwig und Poll, bei denen längere Zeit außerhalb des Organismus aufbewahrte Stücke eines Mäusekarzinoms nach Impfung, also nach Uebertragung in ein Lebewesen, einen Tumor vom Typus der Ausgangsgeschwulst erzeugten, ebenso die Versuche von Wentscher, Morpurgo und anderen Autoren, welche 10 bezw. 22 Tage außerhalb des Körpers in Kochsalz oder trocken aufbewahrte Haut- resp. Periostatückchen transplantierten und dann 4 Tage nach der Transplantation und später Mitosen resp. Neubildung von Knochengewebe in ihnen fanden, gehören nicht in das Gebiet der Explantation, da die Befunde nicht erhoben wurden, solange sich die Gewebsstückchen außerhalb des Organismus befanden. Geeigneter ist für solche Versuche der Terminus temporäre Explantation (Oppel) mit nachfolgender Replantation (Autoreplantation, Homoioreplantation und Heteroreplantation, Oppel). Auch bei der besonders durch L. Loeb ausgebildeten Methode, bei der Gewebsstückchen in Blutcoagula oder Agar in einen Organismus überpflanzt werden, der als lebender Brutofen dient und dem Transplantat gleichmäßige Temperatur und Lymphzufluß gewährt, handelt es sich, soviel Uebereinstimmendes beide Untersuchungsmethoden ergaben, doch um Transplantation. Dagegen ist es nicht ausgeschlossen, daß manche der als Autolyse bezeichneten Vorgänge (soweit dieselbe außerhalb des Organismus beobachtet wird) wenigstens zu Beginn der Autolyse noch auf Lebensvorgängen beruhen und damit in das Gebiet der Explantation gehören. Dafür scheinen auch die Feststellungen von Laqueur zu sprechen, nach denen Sauerstoff die Autolyse hemmt, Kohlensäure sie dagegen fördert, wie auch schon von den ersten Forschern, welche mit dieser Methode gearbeitet haben, der Gedanke geäußert worden ist, daß die als Autolyse bezeichneten Vorgänge auch während des Lebens eine Rolle spielen.

Weit größer, als hier dargestellt, ist das Gebiet der Explantation, wenn wir an die bei niederen Tieren und besonders im Pflanzenreiche bestehenden Explantationsmöglichkeiten denken.

Literatur. *R. G. Harrison, The cultivation of tissues in extraneous media as a method of morphogenetic study. The Anatomical Record, Vol. 6, Nr. 4, 1912. — A. Oppel, Die Explantation als wissenschaftliche Forschungsmethode. In: Causal-morphologische Zellenstudien, V. Mitteilung, Anhang. Archiv f. Entwickelungsmechanik der Organe, Bd. 35, H. 3, 1912 (hierin siehe zahlreiche Literaturangaben).*

A. Oppel.

Explosionen.

1. Begriff der Explosion. 2. Die Entzündungstemperatur. 3. Die Sensibilität. 4. Der Initialimpuls. 5. Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit. 6. Die Explosionswärme. 7. Die Explosionstemperatur. 8. Explosionsflamme und Schlagwettersicherheit. 9. Der Explosionsdruck. 10. Die Brisanz. 11. Gasförmige explosible Systeme. 12. Feste und flüssige Explosivstoffe.: a) Schwarzpulver. b) Rauchloses Pulver. c) Nitroglycerin. d) Dynamit. e) Nitrocellulose. f) Knallquecksilber.

1. Begriff der Explosion. Die Geschwindigkeit chemischer Reaktionen ist in hohem Maße von der Temperatur abhängig und steigt mit dieser (vgl. den Artikel „Chemische Kinetik"). Bei langsamen Reaktionen wird sich die Temperatur des Reaktionsgemisches durch die Reaktionswärme kaum ändern, da Temperaturausgleich mit der Umgebung stattfindet. Ist die Geschwindigkeit eine größere, so wird bei endothermen Reaktionen (vgl. den Artikel „Thermochemie") sich das System abkühlen und die Geschwindigkeit wird sinken, bei exothermen Vorgängen hingegen wird sich das System erwärmen, die dadurch gesteigerte Geschwindigkeit wird erhöhte Wärmeentwickelung zur Folge haben und die gesamte Umwandlung des Systems wird sich schließlich in kurzer Zeit mit großer Heftigkeit vollziehen. Sind die Ausgangsstoffe und Endprodukte gasförmige oder entwickeln sich bei der Zersetzung flüssiger oder fester Stoffe und Gemische Gase in größerer Menge, so sind solche heftige Reaktionen von einer schnellen Volumzunahme und, namentlich wenn sie im geschlossenen Raum sich abspielen, von einer plötzlichen Drucksteigerung begleitet. Derartige Vorgänge nennt man Explosionen. Eine Explosion ist also definiert als eine exotherme chemische Reaktion, bei der gasförmige Produkte durch die freiwillige Steigerung der Temperatur und der Reaktionsgeschwindigkeit eine heftige Volumbezw. Drucksteigerung bedingen. Man beobachtet deshalb als Begleiterscheinungen Aufflammen, Knall und die zerstörenden mechanischen Wirkungen der Drucksteigerung.

2. Die Entzündungstemperatur. Die Begriffsbestimmung der Explosion lehrt, daß der Eintritt einer solchen in erster Linie von der Reaktionsgeschwindigkeit und deren Anstieg mit der Temperatur abhängig ist. Der weitaus häufigste Fall ist der, daß bei gewöhnlicher Temperatur die Reaktionsgeschwindigkeit explosibler Systeme eine sehr geringe ist, so daß die entwickelte Wärme ohne Erhitzung der Masse an die Umgebung abfließt. Erhöht man aber die Temperatur des Systems, so wird man eine Grenze erreichen oberhalb derer mehr Wärme sich entwickelt als an die Umgebung abfließt und

Digitized by Google

damit wird die Explosion einsetzen. Diese Grenztemperatur bezeichnet man als **Entzündungs- oder Verpuffungstemperatur.** Es ist deutlich, daß es sich dabei nicht um eine völlig scharfe für ein jedes explosibles Gebilde charakteristische Grenze, sondern mehr um ein Übergangsgebiet handelt, da ja alle Faktoren, welche die Wärmeableitung beeinflussen, auch die Entzündungstemperatur verschieben müssen.

Verpuffungstemperaturen explosibler Gasgemische sind auf verschiedenen Wegen bestimmt worden. Mallard und Le Chatelier bedienten sich eines erhitzten Porzellanrohres. Dasselbe wurde einmal mit dem explosiblen Gase gefüllt und festgestellt ob Verpuffung eintrat, darauf wurde das Rohr evakuiert, mit einem Luftbehälter verbunden und das einströmende Luftvolum gemessen, woraus sich die Temperatur des Rohres berechnen ließ. Um einen eventuellen katalytischen Einfluß der erhitzten Rohrwände auszuschalten, hat Falk die Gasgemische in Stahlzylindern adiabatisch komprimiert und aus dem zur Entzündung notwendigen Druck die Verpuffungstemperaturen berechnet. Die Versuche von Falk sind durch Dixon wiederholt worden. Einige Werte von Mallard und Le Chatelier enthält die folgende Tabelle:

Tabelle 1.

Gasgemisch		Verpuffungstemperatur ° C
Wasserstoff	$2H_2+O_2$	550—570
Knallgas	H_2+2O_2	530
	$10H_2+O_2+4N_2$	530—570
	$5H_2+2O_2+8N_2$	550
	$2H_2+O_2+3CO_2$	560—590
Kohlenoxyd	$5CO+O_2$	630—650
Knallgas	$2CO+O_2$	650
	$CO+2O_2$	650—660
	$5CO+2O_2+8N_2$	650—660
	$2CO+O_2+3CO_2$	700—715

Auffällig gering ist der Einfluß zugesetzter an der Reaktion nicht beteiligter Gase.

Die Verpuffungstemperaturen fester und flüssiger Explosivstoffe werden in der Weise festgestellt, daß ein starkes leicht verkorktes Reagenzrohr mit 0,1 g der Substanz beschickt und in ein 100° heißes Ölbad getaucht wird. Die weitere Erhitzung wird so geleitet, daß die Temperatur in jeder Minute um 5° steigt bis Verpuffung eintritt.

Tabelle 2.
Verpuffungstemperaturen.

Schießwolle (13 % Stickstoff)	183—186°
Nitroglycerin	160—220°
Dynamit (75 % Nitroglycerin)	180—200°
Pikrinsäure	bis 225° keine Verpuffung
Knallquecksilber	160—165°
Schwarzpulver	bis 225° keine Verpuffung

Unreine Sprengstoffe, z. B. schlecht ausgewaschene Schießwolle, besitzen niedrigere Verpuffungstemperatur. Die Bestimmung derselben bildet deshalb in der Technik ein Hilfsmittel zur Kontrolle eines Sprengstoffes.

3. Die Sensibilität. Mit Sensibilität bezeichnet man die Eigenschaft eines Stoffes oder Gemenges durch Zufuhr geringer Mengen von Energie in irgendwelcher Form zur Explosion zu kommen. Die Höhe der Entzündungstemperatur wird also ein gewisses Maß für die Sensibilität abgeben. Außerdem prüft man auf Sensibilität durch Messung der Empfindlichkeit der Stoffe gegen Schlag und Stoß. Bei der Fallprobe wird die Substanz in dem Fallhammer in die Ausbohrung eines Stahlblockes gebracht und mit einem Staniolblatt bedeckt. Auf einen leicht gegen den Sprengstoff angedrückten Stahlbolzen läßt man ein in einer Führung laufendes Gewicht fallen und mißt die zur Explosion notwendige Fallhöhe.

Tabelle 3.
Empfindlichkeit der Explosivstoffe unter dem Fallhammer von 2 kg.

Explosivstoff	Fallhöhe cm
Knallquecksilber	2
Trinitroglycerin	4
Bleipikrat	5
Gurdynamit, plastisch	7
Sprenggelatine, plastisch.	12
Gurdynamit, gefroren	20
Rauchlose Jagdpulver	30—45
Sprengpulver	85
Schwarzpulver, grobkörnig . . .	100
Roburit Ia.	105
Schießbaumwolle mit über 20 % Wasser	>180

Die Sensibilität steht offenbar in gewissem Zusammenhang mit der chemischen Struktur der Moleküle. Van't Hoff hat auf derartige Beziehungen aufmerksam gemacht und gezeigt, welche Atomkomplexe besonders zum Zerfall neigen und einer Substanz explosiblen Charakter erteilen. Es sind besonders die folgenden Bindungen zu nennen:

O—O z. B. Ozon und die Superoxyde.
N=N z. B. Diazokörper.
C≡C z. B. Acetylen und Polyacetylen.
N≡C z. B. Fulminate und Cyan.
O—Cl z. B. Chlorate und Perchlorate.

Die chemische Molekularstruktur ist aber nicht allein maßgebend für die Sensibilität; in erster Linie ist noch die Wärmetönung von Einfluß und daneben eine Reihe physikalischer Eigenschaften wie Aggregatzustand, Dichte, Härte usw.

4. Der Initialimpuls. Die Betrachtungen über Sensibilität haben gezeigt, daß ein Explosivstoff zur Explosion der Zufuhr einer gewissen Energiemenge bedarf, welche ein-

mal das System auf seine Entzündungstemperatur erhitzen, dann aber noch, namentlich bei heterogenen Mischungen, eine gewisse vorbereitende Arbeit leisten muß, indem sie z. B. durch Schmelzen einer der Komponenten eine innige Berührung der Bestandteile herbeiführt, ohne die eine schnelle Reaktion überhaupt nicht vor sich gehen könnte. Diese die Explosion herbeiführende Energiezufuhr wird als Initialzündung oder Initialimpuls bezeichnet. Sie kann unter Umständen winzig klein sein, weil nicht die ganze Masse des Sprengstoffs, sondern nur ein minimaler Teil zur Explosion gebracht werden muß um die weitere Explosion zu veranlassen. Der Initialimpuls kann auf ganz verschiedene Weise gegeben werden, zunächst allgemein durch Erhitzung, z. B. durch Zündung mit einer Flamme oder mittels elektrischer Funken, weiter durch Reibung oder Stoß, dann durch Sprengkapselzündung und schließlich durch sogenannte Übertragung.

Die Zündung durch Flamme oder Funken beruht auf der Erhöhung der Reaktionsgeschwindigkeit mit der Temperatur; die Erhitzung an einem Punkte genügt, damit von dort aus sich die heftige Reaktion durch die ganze Masse fortpflanzt.

Bei der Zündung durch Reibung oder Stoß handelt es sich nicht um eine spezifische Wirkung, sondern es ist auch hier lediglich die damit verknüpfte Temperatursteigerung, welche zündend wirkt.

Die Möglichkeit mittels Sprengkapsel zu zünden, d. h. dadurch, daß man an einem Punkt der Masse eines Explosivstoffes eine geringe Menge eines zweiten zur Explosion bringt, wurde von A. Nobel angegeben; er fand auch eine besonders geeignete Füllung für Sprengkapseln in dem Knallquecksilber. Allgemein müssen für Sprengkapseln Stoffe verwendet werden, welche große Sensibilität besitzen und welche sich durch hohe Detonationsgeschwindigkeit auszeichnen, um ihre Explosion leicht auf die zu zündende Masse übertragen zu können. Diese Art der Zündung beruht auf der sehr starken lokalen Wärmeentwickelung, aber auch auf der plötzlichen Druckentfaltung. Bemerkenswert ist, daß Sprengkapselzündung unter Umständen weit heftigere Explosion veranlassen kann, als sie mit anderem Initialimpulse bei dem gleichen Stoffe zu erreichen ist und daß mit Sprengkapseln noch Systeme gezündet werden können, bei denen z. B. Funkenzündung völlig versagt.

Bei der Zündung durch Übertragung handelt es sich um die Erscheinung, daß die Explosion einer geringen Menge eines sehr sensiblen Initialsprengstoffes auf eine gewisse Entfernung auch durch die verschiedensten Medien hindurch auf ein explosibles System übertragen wird, ohne daß eine genügende direkte Uebertragung von Wärme oder ein Abschießen materieller Teilchen stattfindet. Die Zündung erfolgt also dadurch, daß eine Kompressionswelle oder ein Explosionsstoß von dem Initialsprengstoff auf das zu zündende Gebilde übergeht. Dabei ist die Tatsache von besonderem Interesse, daß zur Zündung eines bestimmten Stoffes auf diesem Wege bestimmte Initialsprengstoffe besonders geeignet sind, während andere und zwar auch solche mit höherer Energieentwickelung unwirksam bleiben. Früher glaubte man auf Grund der Ansichten von Abel, daß hier eine gewisse Resonanz zwischen den molekularen Schwingungen des initiierenden und des zu zündenden Stoffes zur Uebertragung notwendig sei. Erheblich glaublicher ist, daß der dynamische Druck, der von dem Orte der Initialzündung ausgeht, die Explosion der Sprengmasse herbeiführt. Bei ausreichender Beschleunigung wirkt jedes Gas, das sich zwischen dem Orte der Initialzündung und der Sprengmasse befindet, wie die Masse eines festen Hammers, dessen Schlag die Sensibilitätsgrenze überschreitet. In diesem Sinne hat sich Wöhler auf Grund seiner Versuche mit Matter ausgesprochen.

5. Die Geschwindigkeit der Fortpflanzung. Die Geschwindigkeit, mit der sich die an einer Stelle eines explosiblen Systems eingeleitete Umsetzung durch die ganze Masse fortpflanzt, ist eine für das System besonders charakteristische Größe; denn von dieser Geschwindigkeit wird in erster Linie die Art der mit der Explosion verbundenen Druckentwickelung abhängen.

Die ersten Versuche, diese Größe experimentell zu bestimmen, führten zu auffallend niedrigen Werten. So fand Piobert beim Schwarzpulver Geschwindigkeiten von etwa 10 mm in der Sekunde beim Anzünden einer festen Pulvermasse und solche von 3,5 m in der Sekunde bei einer aus einzelnen Körnern bestehenden Probe, bei der die Explosion sich von Korn zu Korn durch eine Luftschicht übertrug.

Genauer sind die Verhältnisse dann an explosiblen Gasgemengen verfolgt worden. Bunsen ging in der Weise vor, daß er das aus einer feinen Öffnung austretende Gemisch anzündete, die Strömungsgeschwindigkeit bestimmte und dieselbe so lange herabminderte bis die Flamme zurückschlug. Er fand für Wasserstoffknallgas Werte von 34 m, für Kohlenoxydknallgas von nur 1 m in der Sekunde. Auch von anderer Seite wurden mit verfeinerten Methoden ähnliche Geschwindigkeiten beobachtet. Dabei ergab sich, wie zu erwarten eine Abhängigkeit von der Zusammensetzung der Gasmasse. Bei einem bestimmten Mischungsverhältnis besitzt die Geschwindigkeit ein Maximum, der Zusatz

Digitized by Google

des einen oder des anderen der Komponenten setzt dieselbe herab und sobald dieser Zusatz eine bestimmte Grenze überschreitet, verschwindet die Entzündbarkeit. Diese bei allen explosiblen Gasmischungen auftretenden Grenzzusammensetzung bezeichnet man als untere und obere Explosionsgrenze. Für einige Mischungen sind die Werte in Tabelle 4 zusammengestellt.

Tabelle 4.
Explosionsgrenzen für Mischungen einiger Gase und Dämpfe mit Luft

	Vol.-Proz.
Wasserstoff	9,5—66,5
Kohlenoxyd	16,5—75,0
Methan	6 —13
Leuchtgas	8 —19
Acetylen	3,5—52,5
Aether	2,7— 7,7
Alkohol (96 %)	4,0—13,7
Benzol	2,7— 6,3
Benzin	2,4— 4,9

Es ist zu betonen, daß es sich bei diesen Grenzwerten nicht um völlig festliegende charakteristische Konstanten handelt, denn sie sind noch von einer Reihe verschiedener Faktoren abhängig. Zunächst ist die Art der Versuchsausführung deswegen maßgeblich, weil alle Umstände, welche die Wärmeableitung begünstigen, die Fortpflanzungsgeschwindigkeit herabmindern. Gesteigert hingegen wird dieselbe durch Steigerung der Temperatur der Gasmischung vor der Entzündung. So sind z. B. Methan-Luftgemische bei höheren Temperaturen in jedem Mischungsverhältnis entzündbar. Auch Drucksteigerung erweitert das Gebiet der entflammbaren Mischungen. Bei weitem der wichtigste Einfluß ist aber der Art der Entzündung zuzuschreiben. Durch Anwendung größerer und größerer Funken können die Explosionsgrenzen mehr und mehr erweitert werden. Geht man zu Zündung durch Sprengkapseln über, so kann man Gasmischungen zur Explosion bringen, bei denen Funkenzündung völlig versagt.

Wenn also die Explosionsgrenzen von den verschiedensten Bedingungen abhängig sind, so hängt damit unmittelbar zusammen, daß auch die Werte für die Fortpflanzungsgeschwindigkeit selbst ähnlichen Einflüssen unterworfen sind. Wenn man nämlich die Versuchsbedingungen so variiert, daß die Wärmeableitung gering wird, oder daß sich in der Reaktionsmasse höhere Drucke ausbilden können, vor allem aber wenn man die Heftigkeit der Entzündung steigert, etwa durch Verwendung starker Funken oder durch Zündung mit Knallquecksilber, so findet man Fortpflanzungsgeschwindigkeiten, die die früher angeführten geringen Werte ganz bedeutend übersteigen können. So konnte z. B. Berthelot zeigen, daß beim Wasserstoffknallgas die anfangs wie bei Bunsen sich nur mit wenigen Metern in der Sekunde fortpflanzende Explosion bei geeigneter Versuchsanordnung schneller und schneller weiterläuft und schließlich Geschwindigkeiten von etwa 3000 m in der Sekunde erreicht.

Derartige Beobachtungen haben zu der Erkenntnis geführt, daß man bei allen explosiblen Systemen ein Abbrennen mit zwei völlig verschiedenen Arten von Fortpflanzungsgeschwindigkeit zu unterscheiden hat. Der eine Vorgang, den man als Deflagration bezeichnet, ist charakterisiert durch Geschwindigkeiten, die nach wenigen Metern in der Sekunde zählen, während bei der zweiten Erscheinungsform, der Detonation, Geschwindigkeiten von mehreren tausend Metern in der Sekunde auftreten.

Diese Verhältnisse besagen, daß die Fortpflanzung entweder auf thermischer oder auf dynamischer Zündung beruht. Die thermische Zündung geht bei passenden Versuchsbedingungen freiwillig in die dynamische über. Dies liegt daran, daß mit steigender Reaktionsgeschwindigkeit sich nicht nur der Druck sondern auch die Drucksteigerung in der Zeiteinheit vermehrt. Die Drucksteigerung in der Zeiteinheit ist aber nichts anderes als der Stoß, der auf die Nachbarteilchen ausgeübt wird. Die chemische Selbstbeschleunigung der fortschreitenden Reaktion, die durch die Steigerung der Temperatur bewirkt wird, bedingt also ihrerseits eine Steigerung der Stoßwirkung auf die benachbarten Teile. Geht diese so weit, daß es zur Stoßzündung kommt, wie wir sie unter dem Fallhammer beim Sensibilitätsversuch hervorrufen, so haben wir die Erscheinung der Kompressionswelle oder Explosionswelle, welche sich bei der Detonation mit großer Geschwindigkeit durch die ganze Masse fortpflanzt.

Die Detonationsgeschwindigkeit ist für eine große Zahl explosibler Systeme experimentell bestimmt worden; besondere Aufklärung haben die an Gasgemischen ausgeführten Messungen Dixons erbracht. Tabelle 5 enthält Werte der Detonationsgeschwindigkeit.

Tabelle 5.

	Detonationsgeschwindigkeit
A. Gasgemenge.	m/sec.
$2H_2+O_2$	2820
H_2+Cl_2	1730
$2CO+O_2$	1680
$2CH_4+3O_2$	2320
$2C_2H_2+5O_2$	2390
B. Flüssige Explosivstoffe.	
Nitroglycerin	1000—1600
Methylnitrat	2100

Digitized by Google

C. Feste Explosivstoffe 1. einheitliche.	Detonationsgeschwindigkeit m/sec.
Knallquecksilber	3920
Nitrocellulose (trocken) .	3700—3800
Nitrocellulose (feucht) .	5900—6100
Pikrinsäure.	7700—8200
2. Gemenge	
Gurdynamit	zwischen 1900 u. 6800
Sprenggelatine	7700
Kohlenkarbonit	2700
Cheddit	2550—2900

Auch bei der Detonationsgeschwindigkeit handelt es sich nicht um ganz festliegende Werte; auch hier bedingen der Druck, die Anfangstemperatur, Material und Weite der Versuchsröhren und schließlich auch noch die Heftigkeit der Zündung erhebliche Unterschiede.

6. Die Explosionswärme. Von wesentlicher Bedeutung für Explosionsvorgänge ist die dabei entwickelte Wärmemenge. Dieselbe läßt sich leicht berechnen, wenn man die entstehenden Stoffe kennt; sie ist gleich dem Unterschied zwischen der Bildungswärme der Endprodukte aus den Elementen und derjenigen der Ausgangsstoffe. Da bei einer Explosion keineswegs ein Zerfall in die Elemente stattfinden muß, so läßt sich aus der Bildungswärme nicht auf den explosiblen Charakter einer Substanz schließen; es sind sowohl Explosivstoffe mit positiver wie solche mit negativer Bildungswärme bekannt.

Bei der Berechnung der Explosionswärme auf die angegebene Weise ist stets dem Umstand Rechnung zu tragen, daß bei der Explosion ein und desselben Sprengstoffs je nach den Versuchsbedingungen verschiedenartige Endprodukte entstehen können.

Experimentell läßt sich die Explosionswärme in der Explosionsbombe bestimmen; eine bekannte Menge des Sprengstoffes wird durch elektrische Zündung in einer Stahlbombe, die sich in einem Wasserkalorimeter befindet, zur Verpuffung gebracht. Aus der genau gemessenen Temperatursteigerung ergibt sich die Wärmetönung. Tabelle 6 enthält die Explosionswärme einer Reihe wichtiger Sprengstoffe.

Tabelle 6.

Sprengstoff	Explosionswärme[1]
Sprenggelatine (7 % Kollodiumwolle)	1640
Nitroglycerin	1580
Dynamit (75 % Nitroglycerin)	1290
Schießwolle (13 % Stickstoff) .	1100
Pikrinsäure.	810
Schwarzpulver	685
Ammonsalpeter	630
Knallquecksilber	410

[1]) Große Kalorien, bezogen auf 1 kg Sprengstoff, konstantes Volumen; entstehendes Wasser flüssig angenommen.

Die Wärmetönung bei Explosionen ist, vergleicht man sie mit derjenigen bei anderen chemischen Verbrennungsvorgängen, keineswegs außergewöhnlich groß. Die Sonderstellung der Explosionsvorgänge ist nur dadurch bedingt, daß die Reaktionswärme sich in äußerst kurzer Zeit entwickelt. Daraus ergibt sich dann weiter, daß der Wert eines Sprengstoffes keineswegs aus seiner Explosionswärme allein hergeleitet werden darf, sondern daß die Geschwindigkeit mit der der Vorgang abläuft, in erster Linie zu berücksichtigen ist.

7. Die Explosionstemperatur. Wird bei einer Explosion die Wärmemenge Q entwickelt, so kann man daraus die Höchsttemperatur bei der Explosion berechnen, wenn man für die Reaktionsprodukte die spezifische Wärme und deren Abhängigkeit von der Temperatur kennt. Setzt man die spezifische Wärme $c = a + bt$, so erhält man für die Explosionstemperatur t den Ausdruck

$$t = \frac{-a + \sqrt{a^2 + 4bQ}}{2b}$$

Folgende Werte sind danach berechnet worden:

Tabelle 7.

Explosivstoff	t
Nitroglycerin	3470
Gurdynamit	3160
Schießbaumwolle	2710
Pikrinsäure.	2430
Trinitrotoluol	2468
Schwarzpulver	2770
Knallquecksilber	3530

Genauere direkte Messungen der Höchsttemperatur sind bei Explosivstoffen bisher nicht gelungen. Neben der Reaktionswärme gestattet die Messung des Maximaldruckes eine Berechnung. Ein dritter Weg besteht darin, daß man durch Analyse der Reaktionsprodukte die relative Menge eines bei hohen Temperaturen sich bildenden Stoffes z. B. des Stickoxyds bestimmt. Kennt man für diesen Stoff die Abhängigkeit des Gleichgewichts von der Temperatur, so läßt sich aus der gefundenen Menge die Höchsttemperatur berechnen, vorausgesetzt, daß sich während der Abkühlung nach der Explosion keine beträchtlichen Mengen jenes Stoffes zersetzt haben.

8. Explosionsflamme und Schlagwettersicherheit. Bei fast allen Explosionen bildet sich eine Explosionsflamme aus. Größe und Dauer derselben hat man durch photographische Aufnahmen auf rotierendem Film kennen gelernt. Die Größe wächst bei gleicher Stoffmenge mit der Explosionswärme. Flammengröße und Dauer sind in erster Linie maßgeblich für die Schlagwettersicherheit eines Sprengstoffes, das heißt für die Eigenschaft in der Nähe des Sprengortes befindliche explosible Gasgemische nicht zu zünden.

Digitized by Google

Die Prüfung auf Schlagwettersicherheit erfolgt in einem Versuchsstollen, der mit einem Methan-Luftgemisch gefüllt wird und in dessen einer Mauerquerwand mit Bohrloch versehene Stahlmörser eingelassen sind. Die Mörser werden mit dem zu untersuchenden Sprengstoff beschickt und abgeschossen.

9. Der Explosionsdruck. Die Arbeitsfähigkeit explosibler Systeme beruht darauf, daß die gasförmigen Reaktionsprodukte durch die entwickelte Wärme stark erhitzt werden, so daß im Explosionsraum bedeutende Drucke entstehen. Diese Druckentwickelung ist eng verknüpft mit der Explosionsgeschwindigkeit, denn je größer die letztere, um so geringer ist die durch Leitung und Strahlung abgeführte Wärme.

Man hat zu unterscheiden zwischen dem gewöhnlichen statischen und dem dynamischen Druck. Der statische Druck ist derjenige, welchen die Explosionsprodukte zufolge ihrer Temperatur und Masse auf die Wände des Gefäßes ausüben. Solange die Explosion nicht sehr rasch verläuft, ist diese Art des Druckes die einzige, welche wirkt. Ändert sich der Druck aber sehr rasch, so verhalten sich die der Druckänderung unterworfenen Anteile der Gasmasse genau so, als ob sie durch einen Wurf in Bewegung gesetzt würden und diese ihre Wurfbewegung gegen die Wand ruft einen zweiten, den dynamischen Druck hervor, welcher sich zu dem statischen addiert.

Ueblicherweise wird das Ergebnis von Druckmessungen so interpretiert, als ob der gemessene Wert allein durch einen statischen Druck zustande gekommen wäre. Die so abgeleiteten Höchstdrucke stellen dann unter Umständen keineswegs die wahren Werte der auf die Wand ausgeübten Beanspruchung dar. Die letztere kann vielmehr erheblich größer sein, wenn die dynamische Wirkung der raschen Drucksteigerung hinzutritt. Will man den dynamischen Druck kennen lernen, so muß man den Verlauf der Druckänderung mit der Zeit beobachten. Man findet dann im allgemeinen einen Druckanstieg, der zunächst beschleunigt, dann aber verzögert ist und nach Erreichung eines **Maximaldruckes** in einen Druckabfall übergeht.

Die Geschwindigkeit der Druckentwickelung ist sowohl bei gasförmigen wie auch bei flüssigen und festen Explosivstoffen verfolgt worden. Von besonderem Interesse namentlich für die Kenntnis der Vorgänge in Schießwaffen wie auch zur Beurteilung der Sprengstoffe sind die Werte des Maximaldruckes. Für ein Gemisch von Kohlenoxyd und Sauerstoff fand Bunsen den Maximaldruck zu 11,2 Atm. Mallard und Le Chatelier bestimmten den höchsten Druck in einem explodierenden Gemenge aus einem Volum Methan, zwei Volumina Sauerstoff und neun Volumina Luft zu 6,5 Atm. Der Wert ist von Bedeutung für die Beurteilung der Wirkung von Schlagwetterexplosionen. Der Maximaldruck, den die Explosion fester und flüssiger Stoffe auszuüben imstande ist, ist in hohem Grade abhängig von der Ladedichte, das heißt von dem Verhältnis des Gewichtes des Explosivstoffes zum Volum des Explosionsraumes. Unter dem spezifischen Druck versteht man den Maximaldruck bei der Ladedichte = 1, wenn also z. B. 1 g Substanz im Raume von 1 ccm explodiert. Durch Arbeiten von A. Nobel und F. Abel, welche große Substanzmengen in einer Bombe explodierten und die dadurch hervorgerufene Stauchung eines Kupferblockes maßen, ist die Abhängigkeit zwischen Maximaldruck und Ladedichte festgestellt worden. Danach wurde für eine Reihe von Sprengstoffen der Maximaldruck für verschiedene Ladedichte berechnet. Tabelle 8 enthält die Werte, ausgedrückt in Atm. pro 1 qcm.

Tabelle 8.

Ladedichte	Schwarzpulver	Nitroglycerin	Schießbaumwolle	Pikrinsäure	Knallquecksilber
0,1	336	1 098	1 061	983	468
0,3	1 123	3 847	3 921	3 650	1 501
0,5	2 112	7 829	8 502	7 982	2 686
0,7	4 201	21 520	24 810	24 030	4 952
1,0	6 236	35 010	—	—	6 602
1,4	1 430	—	—	—	11 320
1,6	29 340	—	—	—	14 560
2,4	—	—	—	—	43 970

10. Die Brisanz. In naher Beziehung zu der Geschwindigkeit des Druckanstieges steht eine Eigenschaft explosibler Systeme, die man als Brisanz bezeichnet. Dieselbe ist nicht etwa der Ausdruck für eine einzige zahlenmäßig meßbare Eigenschaft, sondern man bezeichnet damit mehr die Art der Wirkung eines Explosivstoffes. Maßgeblich für die Brisanz ist in erster Linie die Geschwindigkeit der Verbrennung bezw. der Detonation, dann die damit zusammenhängende Geschwindigkeit der Drucksteigerung, weiter die Reaktions-

Digitized by Google

wärme, die Menge der entwickelten Gase, die Dichte des Materials usw. Brisante Stoffe sind solche, bei denen träge Massen in nächster Nähe des Explosionsortes momentan in kleinste Teilchen zerspritzt werden, während solche bei nicht brisanten Sprengstoffen in großen Stücken in bestimmter Richtung weggeschleudert werden. Die brisante Wirkung ist auf die nächste Umgebung des explodierenden Stoffes beschränkt. Brisante Stoffe werden, selbst wenn sie völlig frei liegen oder nur wenig eingedämmt sind, bedeutende zerstörende Wirkungen ausüben können.

Verschiedene Versuchsanordnungen sind angegeben worden, um über die Brisanz ein Urteil zu gewinnen. Man legt z. B. eine Patrone des Explosivstoffes auf eine dicke Bleiplatte und bringt dieselbe durch eine Sprengkapsel zur Zündung. Die Tiefe und Art des erzeugten Loches kann als Maßstab benutzt werden. Bei der Trauzlschen Probe wird in der Mitte eines Bleiblocks von bestimmten Maßen eine Bohrung angebracht, deren Dimensionen festgelegt sind. Die Bohrung wird mit 10 g Substanz und einer Sprengkapsel beschickt, der freie Raum mit Sand ausgefüllt. Bei der Explosion entsteht eine flaschenartige Erweiterung, deren Volum als Maß der Brisanz dient. Die folgende Tabelle giebt einige Zahlen:

Tabelle 9.

Explosivstoff	Ausbauchung im Bleiblock in ccm
Nitromannit	650
Nitroglycerin	600
Schießwolle (13 % Stickstoff)	420
Gurdynamit (75 % Nitroglycerin)	350
Kollodiumwolle (12 % Stickstoff)	250
Pikrinsäure	300
Knallquecksilber	150
Schwarzpulver	30

Da man gelernt hat, die Eigenschaften ein und desselben Sprengstoffes zu variieren, indem man z. B. die Detonationsgeschwindigkeit durch Erhöhung der Dichte oder durch Gelatinieren beeinflußt, so ist die Brisanz kein feststehender Maßstab für einen Explosivstoff und die Einteilung derselben in brisante und nicht brisante läßt sich nicht durchführen.

11. Gasförmige explosible Systeme. Die Anzahl gasförmiger explosibler Systeme ist eine große. Zunächst sind hier zu nennen die Mischungen von Luft oder Sauerstoff mit den meisten oxydierbaren Gasen, also z. B. das Wasserstoff- und das Kohlenoxydknallgas und die Mischungen mit gasförmigen Kohlenwasserstoffen wie Methan, Acetylen usw. Die wichtigsten Eigenschaften solcher Gasmischungen sind bereits in den vorstehenden Betrachtungen gekennzeichnet. Es handelt sich meist um Reaktionen mit hoher Wärmetönung. Die Druckentwickelung ist eine verhältnismäßig geringe, da bereits die Ausgangsstoffe gasförmig sind. In gleicher Weise wie solche Gasgemische besitzen auch die Gemenge von Luft mit den Dämpfen oxydierbarer Flüssigkeiten oder mit den fein zerstäubten und zerspritzten Flüssigkeiten selbst explosiblen Charakter. Die Arbeitsfähigkeit aller solcher Gemische wird in der Technik in den verschiedenen Typen der Motoren, dem Gasmotor, dem Benzin- und dem Petroleummotor ausgenutzt.

Ähnlich wie die Mischung des Wasserstoffs mit dem Sauerstoff ist auch diejenige mit Chlor ein durch seine hohe Empfindlichkeit gegen Belichtung charakterisiertes explosibles Gemenge.

Weiter sei hier noch das Acetylen genannt. Dies Gas, bei dessen Zerfall in die Elemente eine bedeutende Wärmemenge frei wird, ist unter gewöhnlichem Drucke kein eigentlicher Explosivstoff. Sobald man das Gas aber komprimiert, nimmt es sowohl im flüssigen Zustande wie auch in dem des komprimierten Gases äußerst explosiblen Charakter an und kann mit großer Heftigkeit zur Detonation gebracht werden.

Ganz analog den Gemischen von Luft mit oxydablen Gasen, Dämpfen und zerstäubten Flüssigkeiten verhalten sich in Luft verteilte Staubwolken fester Stoffe. Staubexplosionen sind bei den verschiedensten Stoffen wie Kohle, Ruß, Korkmehl, Getreide, Mehl, Zucker, Metallen, Harz, Schwefel usw. beobachtet worden. Durch die äußerst feine Verteilung ist die Berührungsfläche zwischen dem oxydablen Stoff und dem Sauerstoff derart groß geworden, daß bei einer Zündung an einer Stelle die Reaktionsgeschwindigkeit sich leicht so steigern kann, daß Explosion erfolgt. Besondere Beachtung verdienen wegen ihrer Gefährlichkeit die in Kohlenbergwerken auftretenden Kohlenstaubexplosionen.

Im Anschluß an die Gasexplosionen seien hier noch einige Vorgänge gestreift, die auch als Explosionen bezeichnet werden, denen aber nicht ein chemischer sondern ein rein physikalischer Prozeß zugrunde liegt. Bei den Dampfkesselexplosionen findet ein plötzliches Zerreißen der Kessel statt, sobald die Kesselwand an irgendeiner Stelle dem Druck im Innern nicht mehr standzuhalten vermag. Dies kann z. B. dann eintreten, wenn infolge Kesselsteinbildung die Temperatur der Kesselwand eine zu hohe wird oder wenn infolge Siedeverzugs plötzlich der Druck im Kessel zu sehr ansteigt. Sobald aber der Kessel zu bersten beginnt, sinkt der Druck im Innern und die gesamte Masse der überhitzten Flüssigkeit verwandelt sich momentan explosionsartig in Dampf.

Ganz ähnlich sind meist die Vorgänge bei der Explosion von Stahlflaschen, die mit

Digitized by Google

flüssigen oder komprimierten Gasen gefüllt sind. Auch hier wird die Explosion dadurch eingeleitet, daß irgendwelche meist mechanische Ursachen ein Zerspringen der Stahlflasche herbeiführen.

12. Die festen und flüssigen Explosivstoffe. Die praktisch verwendbaren Explosivstoffe lassen sich in drei Klassen einteilen, wobei in erster Linie die Geschwindigkeit des explosiblen Vorgangs die Zugehörigkeit zu der einen oder anderen Klasse bedingt.

Die erste Klasse ist durch eine verhältnismäßig geringe Detonationsgeschwindigkeit ausgezeichnet; die Druckentwickelung im geschlossenen Raume ist eine allmähliche, so daß sich diese Stoffe in besonderer Weise als Treibmittel für Geschosse eignen. Das Schwarzpulver und das rauchlose Pulver sind die Hauptvertreter dieser Gruppe.

In der zweiten Klasse finden wir die Stoffe mit hoher Detonationsgeschwindigkeit. Im geschlossenen Raum wird also der Maximaldruck äußerst schnell erreicht, wodurch eine plötzliche Zerstörung des gesamten Laderaums bedingt ist. Die Substanzen dieser Klasse, von denen der Dynamit und die Nitrocellulose genannt seien, finden vorzugsweise als Sprengstoffe Verwendung.

In die dritte Klasse sind diejenigen Explosivstoffe einzureihen, die mit ähnlich hoher Detonationsgeschwindigkeit, wie sie die Stoffe der zweiten Klasse besitzen, eine große Sensibilität verbinden, so daß sie selbst gegen sehr geringen Initialimpuls äußerst empfindlich sind und etwa wie Merkuriazid bei geringer Erschütterung oder schon bei Berührung mit großer Heftigkeit explodieren. Wenn Stoffe dieser Klasse noch eine hohe Ladedichte besitzen, so eignen sie sich wie das Knallquecksilber oder das Bleiazid vorzüglich als Initialzünder, da dann die lokale plötzliche Druckentfaltung eine enorme wird.

12a) Schwarzpulver. Schwarzpulver ist ein Gemisch von Kalisalpeter, Kohle und Schwefel; die Zusammensetzung variiert etwas. Das frühere deutsche Militärpulver bestand aus 74% Kalisalpeter, 16% Holzkohle und 10% Schwefel. Der Vorgang der Verbrennung folgt ungefähr der Gleichung:

$$20KNO_3 + 10S + 30C = 6K_2CO_3 + K_2SO_4 + 3K_2S_3 + 14CO_2 + 10CO + 10N_2.$$

Die bei der Verbrennung als Rauch auftretenden festen Produkte bestehen danach aus Schwefelkalium, kohlensaurem- und schwefelsaurem Kalium. Neben der Zusammensetzung ist für den Wert eines Schwarzpulvers die Art seiner Mischung, seine Dichte sowie die Größe seines Korns maßgeblich.

Herstellung. Die einzelnen Bestandteile werden in Eisen- oder Holztrommeln mittels Bronzekugeln gekörnt und dann im gewünschten Verhältnis in Ledertrommeln mit Hilfe von Pockholzkugeln gemischt. Die Mischung wird zur Erhöhung der Dichte nach Zusatz von Wasser durch verschiedenartige Behandlung unter Anwendung hoher Drucke zu Kuchen gepreßt, die wieder gepulvert und durch Sieben nach der Korngröße getrennt werden. In neuerer Zeit ist es gelungen, durch Herstellung regelmäßiger Formen aus gepreßtem Pulver, z. B. von Prismen und Würfeln, die Geschwindigkeit der Verbrennung herabzumindern und regelmäßig zu gestalten.

Das Schwarzpulver ist schwach glänzend und schiefergrau; bei Berührung mit einer Flamme oder durch elektrische Funken wird es gezündet und verpufft unter Bildung weißen Rauches. Im geschlossenen Raum durch Sprengkapsel gezündetes Schwarzpulver explodiert unter Detonation mit großer Geschwindigkeit. Seit der zweiten Hälfte des 13. Jahrhunderts als Treibmittel für Geschosse verwendet, wird das Schwarzpulver heute im wesentlichen für Jagdzwecke, in der Feuerwerkerei und wegen seiner geringen Brisanz zum Sprengen in Steinbrüchen und Salzbergwerken verwertet.

12b) Das rauchlose Pulver. Die Aufgabe, ein Treibmittel zu finden, das imstande wäre, den Geschossen höhere Geschwindigkeit als das Schwarzpulver zu erteilen, führte zu den anfangs vergeblichen Versuchen, die Nitrocellulose in der Geschoßtechnik zu verwenden. Erst die Beobachtung, daß sich Nitrocellulose durch Behandeln mit verschiedenen Lösungsmitteln wie Aceton, Pyridin, Nitrobenzol usw. gelatinieren läßt und daß dabei die Detonationsgeschwindigkeit des Stoffes verringert, die Regelmäßigkeit des Abbrennens aber gesteigert wird, führten zu der erfolgreichen Herstellung des rauchlosen Pulvers.

Fein gemahlene Schießbaumwolle wird entwässert, mit dem gleichen Gewicht eines geeigneten Lösungsmittels vermischt, längere Zeit geknetet und durch Walzen zu homogenen durchsichtigen Blättern ausgewalzt. Diese Blätter werden dann zu Streifen und kleinen Blättchen zerschnitten. Das Lösungsmittel entweicht bei dem Prozesse zum größten Teil wieder, die letzten Reste müssen durch Trocknen entfernt werden.

Das rauchlose Pulver besteht also nahezu aus reiner gelatinierter Schießbaumwolle. Die verschiedenen Sorten unterscheiden sich hauptsächlich durch den Grad des Gelatinierens. Besondere Eigenschaften besitzen die zuerst von Nobel unter Zusatz von Nitroglycerin hergestellten Pulver.

Rauchloses Pulver verbrennt an freier Luft angezündet ohne Explosion. Auch Blitzschläge bewirken im Gegensatz zu ihrer Wirkung beim Schwarzpulver nur ein Abbrennen. Reibung und Schlag können Explosion herbeiführen.

Digitized by Google

Die Leistungsfähigkeit des rauchlosen Pulvers ist zwei- bis dreimal so groß als die des Schwarzpulvers.

12c) Das Nitroglycerin. Bei der Behandlung von Glycerin mit einem Gemisch von Schwefelsäure und Salpetersäure erhält man das Nitroglycerin, $CH_2ONO_2CHONO_2$ CH_2ONO_2 den Trisalpetersäureester des Glycerins.

Man läßt bei einer Temperatur von 25° einen Teil möglichst reinen wasserfreien Glycerins in eine in Bleibottichen befindliche Mischung von drei Teilen Salpetersäure (Sp. G. = 1,50) und fünf Teilen Schwefelsäure (Sp. G. = 1,84) langsam einlaufen, wobei durch Kühlung ein Temperaturanstieg über 30° vermieden werden muß. Das entstehende spezifisch leichtere Nitroglycerin schwimmt auf dem Säuregemisch, wird also leicht von diesem abgeschieden, durch Wasser und verdünnte Sodalösung gewaschen und durch Filtration gereinigt.

Nitroglycerin, eine farb- und geruchlose Flüssigkeit vom spezifischen Gewicht 1,6, erstarrt bei 12,5°, kann aber unterkühlt werden. Es ist nicht allzu leicht entzündlich, explodiert aber beim Erwärmen auf 200° und ist empfindlich gegen Stoß und Reibung. Bei der Zersetzung entstehen nach der Gleichung:

$$2C_3H_5(ONO_2)_3 = 6CO_2 + 5H_2O + 3N_2 + \frac{1}{2}O_2$$

Kohlensäure, Wasserdampf, Stickstoff und etwas Sauerstoff und das von 1 Kilo entwickelte Gasvolum beträgt bei 0° und 760 mm 712 Liter.

Das flüssige Nitroglycerin findet als solches kaum Anwendung, es wird hauptsächlich benutzt zur Herstellung der Dynamite und der rauchlosen Pulver mit Nitroglycerinzusatz.

12d) Dynamit. Der flüssige Charakter des Nitroglycerins bedingt seine Gefährlichkeit und die Unmöglichkeit des Transportes. Den Bemühungen Nobels ist es gelungen durch Aufsaugen von Nitroglycerin in Kieselgur eine plastische Masse herzustellen, die den Namen Gurdynamit oder Dynamit I trägt und die als Sprengstoff ausgedehnte Verwendung gefunden hat.

Meist werden drei Teile Nitrolglycerin mit einem Teil von organischen Verunreinigungen befreiter Kieselgur gemischt und durch Drahtsiebe gepreßt. Aus der Masse werden in der Patronenpresse etwa 10 cm lange und 2 cm dicke Würste hergestellt die man in Pergament- oder Paraffinpapier einwickelt.

Der Gurdynamit kann leicht durch Knallquecksilber gezündet werden. Ein großer Nachteil liegt darin, daß die Patronen infolge des hohen Erstarrungspunktes des Nitroglycerins häufig gefrieren, dadurch unempfindlich werden und bei der Zündung leicht versagen. Gefrorene Dynamitpatronen müssen mit großer Vorsicht in besonderen Gefäßen aufgetaut werden. Die Eigenschaften des Dynamits als Sprengstoff sind denen des Nitroglycerins ganz ähnlich.

12e) Nitrocellulose. Die Nitrocellulose wurde 1846 von Schönbein entdeckt; sie ist ein Gemisch verschiedener Salpetersäureester der Cellulose und wird erhalten, wenn man eine Mischung von Salpetersäure und Schwefelsäure auf cellulosehaltige Stoffe (z. B. Baumwolle, Holzfaser usw.) einwirken läßt. Der Grad der Nitrierung hängt von Konzentration und Mischungsverhältnis des Säuregemisches ab. Die Produkte geringerer Nitrierung (Kollodiumwolle, Pyrokollodium) sind in Äther, diejenigen höherer Nitrierung vorzugsweise in Aceton und Essigäther löslich.

Bei der technischen Darstellung werden meist Spinnereiabfälle als Ausgangsmaterial verwendet. Dieselben müssen entfettet, sorgfältig gereinigt und getrocknet werden. Ein Gewichtsteil der Wolle wird mit etwa 50 Gewichtsteilen Säuregemisch eine halbe Stunde auf Zentrifugen behandelt, wobei man die entstehenden Stickoxyde absaugt. Zur Erzielung gleichförmiger Produkte verwendet man vorteilhaft ein Säuregemisch bestehend aus 21—25 % Salpetersäure (100 %ig), 65—70 % Schwefelsäure (100 %ig) und 8—10 % Wasser. Nach Ablassen der Säure muß die nitrierte Wolle, um einen haltbaren Stoff zu bekommen, sehr sorgfältig mit heißem und kaltem Wasser gewaschen werden. Zur Gewinnung trockner Schießbaumwolle wird das Wasser durch Zentrifugieren, Abpressen und Trocknen im Vakuum oder Behandlung mit Alkohol entfernt. Nasse Schießbaumwolle gewinnt man, wenn man den wasserhaltigen Brei durch Anwendung hoher Drucke (bis zu 1000 Atm.) zu Kuchen preßt, die dann noch etwa 10 % Wasser enthalten und eine hohe Ladedichte besitzen.

Die Nitrocellulose ist in Wasser auch in der Hitze unlöslich. Langfaserige gut getrocknete Schießbaumwolle, deren Aussehen dem gewöhnlicher Baumwolle völlig gleicht, brennt an der Luft angezündet mit gelber Flamme ohne Rauchentwickelung schnell aber ohne Detonation ab. Bei momentaner Erhitzung oder beim Abbrennen großer Mengen erfolgt Detonation.

Der maximale technisch erreichbare Stickstoffgehalt beträgt 13,5 %; dies entspricht der Formel $C_{24}H_{29}O_9(ONO_2)_{11}$. Der vorhandene Sauerstoff genügt nicht zur vollkommenen Verbrennung des Kohlenstoffs und Wasserstoffs, so daß neben Wasserdampf, Kohlendioxyd und Stickstoff auch Kohlenoxyd, Wasserstoff und zuweilen Methan als Reaktionsprodukte auftreten. Der Explosionsvorgang einer Schießbaumwolle von

hoher Ladedichte läßt sich etwa durch die Gleichung

$$C_{24}H_{29}O_9(ONO_2)_{11} = 12CO_2 + 12CO + 6H_2O + 8{,}5H_2 + 5{,}5N_2$$

darstellen.

Die Schießbaumwolle wird in stark gepreßter Form hauptsächlich als Sprengstoff für Seeminen und als Ladung für Torpedos verwendet. Ihre Eigenschaft, sich leicht gelatinieren zu lassen hat zur Herstellung des rauchlosen Pulvers geführt.

12f) Das Knallquecksilber. Das Knallquecksilber $Hg(CNO)_2$ zeichnet sich durch seine Verwendbarkeit als Initialzünder aus. Man stellt dasselbe her, indem man 1 Teil Quecksilber in 13 Teilen Salpetersäure vom spezifischen Gewicht 1,36 löst und die Lösung in einen 8 Teile warmen Alkohol enthaltenden Glasballon eingießt. Das Knallquecksilber scheidet sich in Form gelbgrauer Kristalle ab, die gut gewaschen und bei 40° getrocknet werden.

Die Füllmasse für Gewehrzündhütchen besteht aus einer Mischung von Knallquecksilber mit Schwefelantimon, Kaliumchlorat und Glaspulver.

Zum Zünden von Sprengstoffen wird aus Knallquecksilber, Gummilösung und Chlorat ein Brei hergestellt, den man durch ein Sieb zu Körnern zerpreßt und trocknet. Diese Masse wird in Kupferkapseln eingefüllt und kann dort mittels Zündschnur oder auf elektrischem Wege gezündet werden.

Neben dem Knallquecksilber wird für bestimmte Zwecke in neuerer Zeit das Bleiazid als Initialzünder verwendet, das mit großer Brisanz den Vorzug vereint verhältnismäßig wenig empfindlich gegen Schlag und Flamme zu sein.

Literatur. **C. Bichel**, *Untersuchungsmethoden für Sprengstoffe, 1902.* — **R. Biedermann**, *Sprengstoffe, 1910.* — **G. Brunswig**, *Explosivstoffe, in Bredigs Handbuch der angewandten physikalischen Chemie.* — **R. Escales**, *Explosivstoffe, in Dammers chemischer Technologie der Neuzeit, 1910.* — **Derselbe**, *Monographien der Explosivstoffe: Schwarzpulver, Nitrocellulose, Nitroglyzerin, Ammonsalpetersprengstoffe, Chloratsprengstoffe, 1904 bis 1911.* — **J. H. Van't Hoff**, *Vorlesungen.* — **G. Le Chatelier**, *Le carbone, 1911.* — **J. W. Mellor**, *Chemical Statics and Dynamics, 1904.* — **W. Nernst**, *Theoretische Chemie.* — **Derselbe**, *Physikalisch-chemische Betrachtungen über den Verbrennungsprozeß in den Gasmotoren, 1905.* — **L. Wöhler**, *Sprengstoffe, in* **Herzog**, *Organische Technologie, 1912.*

G. Just.

Digitized by Google

F.

Facies.

Der Ausdruck bedeutet in der Geologie und Petrographie die an verschiedenen Stellen verschiedene Beschaffenheit einer Gesteinseinheit, d. h. eines Gesteinskörpers, der seine Entstehung einem gleichzeitigen und gleichartigen Entstehungsprozeß verdankt. So z. B. werden durch einen Fluß gleichzeitig an der einen Stelle Kies, an anderer Sand, an dritter feiner Schlamm abgelagert, oder durch das Meer hier Kalkschlamm, dort Tiefseeton und wieder wo anders Sande, oder man findet bei einem Eruptivgestein an verschiedenen Stellen eine verschiedene chemische und mineralogische Ausbildung, so kann ein Granit in Diorit oder Syenit übergehen (vgl. die Artikel „Schichtung" und „Mineral- und Gesteinsbildung").

Fahlbänder.

So heißen dem Streichen der Schichten parallele Imprägnationen mit feinen Erzpartikelchen (Schwefel-, Magnetkies, Kupferkies, Blende usw.). Man vergleiche den Artikel „Erzlagerstätten".

Fahrenheit
Gabriel Daniel.

Geboren am 14. Mai 1686 in Danzig, gestorben am 16. September 1736 in Holland. Er war der Sohn eines Danziger Kaufmanns und ging, um die Handlung zu lernen, nach Amsterdam. Dort legte er sich indessen bald auf das Studium der Physik. Als Glasbläser und Verfertiger physikalischer und meteorologischer Instrumente scheint er meist in England und Holland gelebt zu haben. Er stellte als Erster zuverlässige Thermometer her, zunächst mit Weingeist, seit 1714 oder 1715 mit Quecksilber gefüllt, mit der unter seinem Namen bekannten Skala versehen, die in England und den Vereinigten Staaten noch in Gebrauch ist. 1721 entdeckte er die Unterkühlung des Wassers.

Literatur. ***Rosenberger***, *Geschichte der Physik II, S. 280 bis 283.*

E. Drude.

Fallen und Streichen.

Unter dem Streichen einer Schicht oder eines Ganges versteht man in der Geologie die Richtung einer auf der Schichtfläche oder der Gangwandung gelegenen horizontalen Linie, unter dem Fallen die Neigung der zu der Streichlinie auf der Schichtfläche oder Gangwandung senkrechten Linie. Streichen und Fallen werden mit dem Geognosier- oder Grubenkompaß bestimmt. Streichen N 25° O, Fallen 60° SO soll z. B. heißen: Die Streichrichtung weicht von der Nordsüdlinie um 25° nach Osten ab und die Schichten fallen mit einer Neigung von 60° nach Südosten hin ein (vgl. den Artikel „Schichtenbau").

Faltung.

Vgl. den Artikel „Schichtenbau".

Faraday
Michael.

Geboren am 22. September 1791 in Newington Butts bei London, gestorben am 25. August 1867 in Hampton Court bei Richmond. Er war der Sohn eines Hufschmieds und trat mit 13 Jahren bei einem Buchbinder in die Lehre, bei dem

Digitized by Google

er 8 Jahre hindurch verblieb. In dieser Zeit studierte er chemische und physikalische Abhandlungen und besuchte 1811 populäre Vorlesungen über Physik. Ein Jahr darauf ermöglichte ihm ein Kunde seines Meisters, die letzten Vorlesungen Sir Humphrey Davys zu hören. Faraday arbeitete diese nach kurzen in der Vorlesung gemachten Notizen aus, und sandte diese Ausarbeitung auf Anraten seines Gönners an Davy, der ihm daraufhin 1813 die Stelle eines Assistenten am chemischen Laboratorium der Royal Institution verschaffte. Vom Oktober 1813 bis April 1815 begleitete er Davy auf Reisen durch Frankreich, die Schweiz und Italien. 1816 hielt er seine ersten Vorlesungen. Später wurde er unter Brande Direktor des chemischen Laboratoriums und 1827 auch Professor der Chemie; in den Jahren 1829 bis 1842 war er außerdem Lehrer an der Militärakademie in Woolwich. 1824 wurde er, zunächst gegen Davys Wunsch, zum Mitglied der Royal Society gewählt. Faradays erste Arbeiten beschäftigten sich mit chemischen Problemen. 1818 schrieb er eine Abhandlung über die singende Flamme und wandte sein Interesse mehr und mehr physikalischen, insbesondere elektrischen Problemen zu, und 1831 begann die Reihe glänzender Untersuchungen, die grundlegend für die Elektrizitätslehre wurden. In den Philosophical Transactions veröffentlichte er diese Untersuchungen unter dem Titel „Experimental researches in electricity" in 30 Serien, deren erste schon die Entdeckung der galvanischen Induktion enthält. Später folgten Untersuchungen über die chemische Zersetzung durch den elektrischen Strom, die ihn 1833 zur Formulierung des elektrolytischen Grundgesetzes — unter dem Namen Faradaysches Gesetz bekannt — führten. Untersuchungen über Selbstinduktion, Diamagnetimus der Körper und zahlreiche andere folgten, fast alle grundlegende Neuentdeckungen enthaltend. Faraday war nicht nur ein genialer Experimentator, auch die Theorie der Elektrizitätslehre hat er durch seine Intuition der Nahewirkungsanschauung auf eine neue Stufe gehoben. Seine Vorstellungen wurden von seinem kongenialen Schüler Maxwell in die klassische, noch heute nicht überholte Form gebracht. Faraday war schon überzeugt von der gegenseitigen Umwandlungsfähigkeit der „Naturkräfte", d. h. der Energien, wie wir heute sagen.

Literatur. ***S. P. Thompson,*** *Michael F., his Life and Work, London 1898.* — ***Tyndall,*** *F. as discoverer, 5. Aufl., London 1894, deutsch von Helmholtz, Braunschweig 1870.* — ***Jones,*** *The life and letters of F., London 1870.* — ***Gladstone,*** *Michael F., London 1873, deutsch Glogau 1882.* — ***Jerrold,*** *M. F., London 1891.*

E. Drude.

Farbe.

1. Physikalische Grundlagen der Farbenempfindungen. 2. Die Körperfarben. 3. Die Oberflächenfarben. 4. Die Farben dünner Blättchen. 5. Die Farben trüber Medien. 6. Resonanzfarben. 7. Dispersionsfarben.

1. Physikalische Grundlagen der Farbenempfindungen. Während das Ohr des Menschen einen Bereich von ungefähr 10 Oktaven, nämlich Töne mit Schwingungszahlen zwischen 40 und 40000 in der Sekunde, aufzufassen vermag, umspannt das menschliche Auge knapp eine Oktave. Nur diejenigen Aetherschwingungen nämlich, deren Schwingungszahlen zwischen 375 und 750 Billionen in der Sekunde liegen, werden von uns als Licht empfunden.

Statt durch ihre Schwingungszahl ν unterscheidet man allerdings die Schwingungen der Optik meistenteils durch ihre Wellenlänge λ, die mit jener durch die Beziehung

$$\lambda = \frac{c}{\nu} \qquad 1)$$

zusammenhängt, wo c die Lichtgeschwindigkeit in dem betreffenden Medium bedeutet und im leeren Raume $= 3.10^{10}$ cm/sec ist. Als Grenzen der Lichtempfindung ergeben sich demnach auf Grund der Gleichung 1 die Wellenlängen 8.10^{-5} und 4.10^{-5} cm, oder, wie man in der Farbenlehre gewöhnlich zu schreiben pflegt, 800 und 400 $\mu\mu$, wo 1 $\mu\mu$ 1 Millionstel Millimeter bedeutet (1 $\mu = 0{,}001$ mm). Strahlen, deren Wellenlängen zwischen diesen Grenzen liegen, werden nun besonders von den glühenden Stoffen ausgesandt, und zwar kommen hiervon für die Farbenempfindung wieder besonders die festen und flüssigen in Betracht, da nämlich diese, wenn ihre Temperatur hoch genug ist, zugleich die sämtlichen überhaupt vom Auge wahrzunehmenden Aetherschwingungen aussenden. Wir haben es also hier mit einem Gemisch aus unendlich vielen Strahlen zu tun, deren Wellenlängen den oben genannten Grenzbezirk vollkommen ausfüllen, ja in der Regel auch noch beiderseits mehr oder weniger darüber hinausragen. Auch unsere Sonne stellt eine solche Strahlenquelle dar, und zwar ist sie für die alltäglichen Farbenempfindungen des Menschen natürlich weitaus die wichtigste von allen.

Trotz ihrer komplizierten Zusammensetzung macht nun die Strahlung eines glühenden festen oder flüssigen Körpers auf das menschliche Auge doch einen vollkommen einheitlichen Eindruck, den wir, wenn dieses Strahlengemisch mit demjenigen der Sonnenstrahlung annähernd übereinstimmt, als Weiß bezeichnen. Am reinsten sieht man dasselbe wohl am frisch gefallenen Schnee, sehr gut ferner auch an hellen Wolken, an weißem Porzellan, Papier usw., wobei allerdings für alle diese nicht leuchtenden Stoffe Voraussetzung ist, daß sie entweder von der Sonne selbst oder von einer hin-

Digitized by Google

sichtlich der Zusammensetzung annähernd gleichwertigen Lichtquelle beleuchtet werden.

Daß nun das weiße Sonnenlicht trotz seines einheitlichen Eindrucks auf das menschliche Auge doch nicht, wie z. B. Goethe meinte, einen einheitlichen, sondern einen sehr komplizierten Vorgang darstellt, ergibt sich daraus, daß sich ein solcher weißer Lichtstrahl z. B. durch ein Prisma oder ein Gitter in eine unendliche Menge von Einzelstrahlungen zerlegen läßt, die man mit diesen Apparaten z. B. auf einem weißen Stück Papier bandförmig nebeneinander als ein sogenanntes Spektrum ausbreiten kann. Die einzelnen Schwingungen des für das Auge in Frage kommenden Bereiches dieses Spektrums werden dann von unserem Sehorgan als verschiedene Farben wahrgenommen und zwar genau genommen jede Wellenlänge als eine andere. In Wirklichkeit allerdings unterscheidet das Auge nur etwa 5 Farbenbezirke des Spektrums vollkommen deutlich als solche; diese sind in folgender Tabelle I zugleich mit den zugehörigen Wellenlängen angegeben.

Tabelle I.
Farbenbezirke des Spektrums.
Wellenlängen in $\mu\mu$

800—600	600—580	580—500	500—430	430—400
Rot	Gelb	Grün	Blau	Violett

Newton allerdings unterschied außer diesen Farben noch zwei andere, nämlich das Orange zwischen Rot und Gelb und das Indigo zwischen Blau und Violett; indessen waren hierfür hauptsächlich theoretische Gründe bestimmend, da er nämlich dadurch auch in der Farbenskala wie in der akustischen Tonleiter auf sieben verschiedene Stufen kommen wollte. Der Vergleich mit den Tonempfindungen ist hier indessen schon deswegen nicht angebracht, weil eine mehr oder weniger große Harmonie der Farben wie bei den Tönen überhaupt nicht existiert.

In der Tabelle I fällt vor allem die geringe Ausdehnung der Gelbempfindung auf, eine Tatsache, die wohl damit zusammenhängt, daß das Auge für diese Farbe die größte Empfindlichkeit hat. Andererseits kann man aber nicht sagen, daß unser Sehorgan allgemein für diejenigen Farben, für welche es die größere absolute Empfindlichkeit hat, auch das größere Farbenunterscheidungsvermögen besitzt, denn es dehnt sich z. B. die Grünempfindung nach der obigen Tabelle I über einen größeren Spektralbezirk aus als die Blauempfindung, trotzdem das Auge für Grün sehr viel empfindlicher ist als für Blau.

Diese verschiedene Empfindlichkeit des Auges für die verschiedenen Spektralfarben geht übrigens annähernd proportional mit der Helligkeit, unter welcher uns die verschiedenen Farben des Sonnenspektrums erscheinen, eine Größe, die zuerst von Fraunhofer bestimmt wurde. Seine Ergebnisse sind in der Tabelle II dargestellt — unter Beifügung der zugehörigen Spektralstelle (Fraunhoferschen Linie), Wellenlänge und Farbe.

Tabelle II.
Relative Helligkeiten im prismatischen Sonnenspektrum nach Fraunhofer.

Linie	B	C	D	—	E	F	G	H
Wellenlänge	687	656	589	560	527	486	431	397
Farbe	Rot	Rot	Gelb	Grüngelb	Grün	Grünblau	Blauviolett	Violett
Helligkeit	3	9	64	100	48	17	3	0,6

Man sieht, daß die Empfindlichkeit des Auges am stärksten im Grüngelb bei etwa 560 $\mu\mu$ ist, und daß sie von da ab nach den beiden Enden des Spektrums hin ziemlich gleichmäßig abnimmt. Für das letzte Rot zwischen 800 und 680 $\mu\mu$ sowie für das ganze Violett ist diese Empfindlichkeit so gering, daß diese Farben für die meisten Farbenwahrnehmungen des täglichen Lebens überhaupt nicht in Frage kommen. Diejenigen Eindrücke nämlich, welche wir für gewöhnlich als Violett bezeichnen, setzen sich meistens aus einer Mischung der beiden Farben Rot und Blau zusammen, wie wir überhaupt sehen werden, daß die meisten Farben des täglichen Lebens keine reinen Spektralfarben sondern ein Gemisch aus sehr vielen derselben darstellen. Ehe wir aber auf diesen Gegenstand eingehen, sei noch erwähnt, daß Strahlen von der Art der Lichtschwingungen, wenn ihre Wellenlänge größer als 800 $\mu\mu$ ist, wegen ihrer Lage im Spektrum als Ultrarot und solche, deren Wellenlänge kleiner als 400 $\mu\mu$ ist, als Ultraviolett bezeichnet werden. Beide Strahlenarten lassen sich indessen, wie schon

Digitized by Google

erwähnt wurde, direkt mit dem Auge überhaupt nicht wahrnehmen, und sie kommen daher auch für unsere Farbenempfindungen noch viel weniger in Betracht als das an sie grenzende letzte Rot bezw. Violett des sichtbaren Spektrums.

Was sodann diejenigen Farbeneindrücke angeht, welche durch die Mischung mehrerer Farben zustandekommen, so mag hier zunächst hervorgehoben werden, daß hier nicht etwa von einer Mischung von Farbstoffen die Rede ist, sondern von einer solchen der verschiedenen Farbenstrahlen des sichtbaren Spektrums. Dies muß nämlich deswegen betont werden, weil die Verwechselung dieser beiden Begriffe schon von jeher zu den größten Irrtümern geführt hat. Es kommt dies hauptsächlich daher, daß man im täglichen Leben unter „Farbe" sowohl einen Farbstoff als auch einen gefärbten Lichtstrahl versteht, während in der Physik diese beiden Begriffe scharf auseinander gehalten werden müssen, da wir sehen werden, daß die Mischung von Farbstoffen hinsichtlich des Farbeneindrucks ganz andere Resultate ergibt als die Mischung von Farben, d. h. von Farbstrahlen. Wenn daher hier von einer Farbe gesprochen wird, so handelt es sich stets um einen bestimmten Lichtstrahl des sichtbaren Spektrums oder auch eine Mischung einer mehr oder weniger großen Anzahl derselben. Von der Mischung von Farbstoffen dagegen wird im folgenden Abschnitt — bei den Körperfarben — die Rede sein.

Um nun aber die bei der Mischung der einzelnen Farben des Spektrums zu erwartenden Farbeneindrücke verstehen zu können, muß man von den Versuchen über die Mischung reiner Spektralfarben ausgehen, wie sie zuerst 1854 von Helmholtz angestellt wurden. Dieser mischte zunächst zwei verschiedene Wellen des Sonnenspektrums dadurch, daß er in das letztere einen Schirm mit zwei beliebig gegeneinander verschiebbaren Spalten brachte und die durch sie hindurchgegangenen Einzelfarben wieder durch eine Linse vereinigte.

Hierbei ergab sich zunächst die bemerkenswerte Tatsache, daß der Eindruck des Weiß, der ja, wie schon erwähnt wurde, durch die Gesamtheit der Wellen des Sonnenspektrums hervorgerufen wird, auch schon durch Vereinigung je zweier einfacher Spektralfarben erhalten wird, und zwar gibt es, genau genommen, wieder unendlich viele solcher Farbenpaare, die zusammen Weiß ergeben, Paare, die man übrigens als elementare Komplementärfarben bezeichnet.

In der folgenden Tabelle III, die von Helmholtz stammt, sind für einige dieser unendlich vielen Farbenpaare nicht bloß die zugehörigen Wellenlängen sondern auch das Verhältnis der Wellenlängen jedes Paares angegeben.

Tabelle III.
Wellenlängen und Wellenverhältnisse elementarer Komplementärfarben.

Farbe	Wellenlänge	Komplementär-farbe	Wellenlänge	Verhältnis der Wellenlängen
Rot	656,2	Grünblau	492,1	1,334
Orange	607,7	Blau	489,7	1,240
Goldgelb	585,3	Blau	485,4	1,206
Goldgelb	573,9	Blau	482,1	1,190
Gelb	567,1	Indigoblau	464,5	1,221
Gelb	564,4	Indigoblau	461,8	1,222
Grüngelb	563,6	Violett	von 433 ab	1,301

Daß das Wellenlängenverhältnis am kleinsten für die in der Mitte der Tabelle aufgeführten Paare ist, hängt damit zusammen, daß sich der Farbenton im Spektrum um die Wellenlänge 580 herum sehr schnell, für die komplementäre Spektralgegend dagegen sehr viel langsamer ändert, wie ja auch aus Tabelle I hervorgeht.

Weiter ist zu der Tabelle III noch zu bemerken, daß darin der mittlere Teil des Spektrums zwischen 560 und 495 $\mu\mu$, d. h. also das eigentliche Grün, vollständig fehlt, oder daß mit anderen Worten diese Farbe überhaupt keine einfache Komplementärfarbe besitzt. Da nun aber andererseits diese Wellen zusammen mit allen anderen Strahlen des Spektrums den Eindruck des Weiß ergeben, so muß es doch möglich sein, auch diese Wellen, wenn auch nicht durch eine, so doch durch mehrere andere Strahlen zu Weiß zu ergänzen. Nach Helmholtz genügen hierzu schon zwei andere Farben, nämlich je eine von den beiden Enden des Spektrums, d. h. das Grün wird erst durch die beiden Farben Rot und Violett zu Weiß ergänzt. In der Praxis allerdings verschwindet, wie schon oben erwähnt wurde, der Eindruck des eigentlichen Violett des Spektrums meistens nahezu vollkommen, so daß man für gewöhnlich auch schon Rot und

Grün allein als komplementäre Farben ansieht.

Kommen wir sodann zu der Mischung solcher Elementarfarben, welche nicht komplementär sind, so haben wir zu unterscheiden zwischen solchen, welche im Spektrum einen geringeren Abstand haben als zwei Komplementärfarben und solchen mit größerem Abstand. Im ersteren Falle stimmt der Ton der Mischfarbe stets mit demjenigen einer im Spektrum zwischen den beiden Komponenten liegenden Wellenlänge überein, und zwar wird der Ton um so gesättigter, je dichter die Komponenten im Spektrum beieinander liegen, und umgekehrt um so weißlicher, je näher sie dem komplementären Paare kommen. So ergibt z. B. die Mischung von Spektralrot und Spektralgelb ein gesättigtes Rotgelb (Orange), diejenige von Rot und Grün dagegen ein weißliches Gelb, und ähnlich liegen die Verhältnisse am anderen Ende des Spektrums.

Ist ferner der Abstand der beiden Mischfarben im Spektrum größer als derjenige zweier komplementärer Wellenlängen, ein Fall, der nach der Tabelle III nur bei der Mischung von Rot mit Blau oder Violett, sowie von Gelb mit Violett auftreten kann, so ergibt sich als Mischfarbe entweder Purpurrot oder Rosarot, das erstere nämlich nur bei der Mischung von Rot und Violett und das letztere in den beiden übrigen Fällen; und zwar gilt auch hier wieder, wie oben, der Satz, daß die Mischfarbe um so weißlicher wird, je näher die beiden Komponenten den komplementären Wellenlängen liegen.

Bei dieser Mischung einzelner Spektralfarben ist ferner noch zu berücksichtigen, daß diese für das Auge eine sehr verschiedene Helligkeit besitzen, und daß daher, wenn man bei der Mischung etwa gleiche Wellenlängenbezirke nimmt, die Farbe der helleren Welle überwiegt. In der Mischung des gesamten Lichtes gleicht sich jedoch dieser Unterschied einesteils deswegen aus, weil die hellste Farbe des Spektrums, das Gelb, nur einen relativ schmalen Wellenbezirk umfaßt, während der dazu komplementäre blaue Teil ziemlich ausgedehnt ist; und weil anderenteils auch das noch sehr helle und ausgedehnte Grün in zwei noch stärker ausgedehnten Spektralbezirken, nämlich dem ganzen Rot einerseits und dem ganzen Violett andererseits, seine komplementären Farben findet.

Bei den Farbeneindrücken des täglichen Lebens handelt es sich nun allerdings in den seltensten Fällen um eine Mischung einzelner Wellenlängen des Spektrums, sondern stets um eine solche ganzer Spektralbezirke, so daß wir auch hierauf noch etwas näher eingehen müssen.

Durch die Mischung mehrerer Elementarfarben des Spektrums ergibt sich nun, wie auch nach dem obigen ohne weiteres verständlich ist, überhaupt kein neuer Farbeneindruck mehr, sondern es kann sich dabei stets nur um eine mehr oder weniger große Verflachung eines bestimmten Farbentones des Spektrums handeln, wenn auch die Mischfarbe dadurch, daß sie stets heller ist als die Komponenten — es handelt sich ja bei dieser Art der Mischung stets um eine Addition von Farbeneindrücken — zumal in den lichtschwächeren Teilen des Spektrums unter Umständen gesättigter erscheinen mag als irgendein Teil des Spektrums selbst. So leuchtet z. B. das Licht, welches von einer Kupferoxydammoniaklösung durchgelassen wird, und welches bei geeigneter Konzentration der Lösung die gesamten blauen und violetten Strahlen des Spektrums — aber auch nur diese — umfaßt, in einem geradezu wundervollen Blau, obgleich es nach den obigen Mischungsregeln natürlich weniger gesättigt sein muß als irgendeine der vielen Komponenten, aus denen es sich zusammensetzt. Jedenfalls sieht man aber aus diesem Beispiel, daß auch die Mischung der gesamten blauen Strahlen des Spektrums keine andere Farbe als Blau ergibt, wie ja auch aus jenen Regeln ohne weiteres folgt.

Benutzt man ferner bei diesen Versuchen eine Farbstoffschicht, welche neben dem größten Teil des Blau des Spektrums auch noch das Grün derselben durchläßt, so erhält man als Mischfarbe wieder, wie die angegebenen Regeln erwarten lassen, einen zwischen den beiden in Frage kommenden Spektralbezirken liegenden Farbenton, d. h. also ein Grünblau oder Blaugrün, je nachdem von den beiden Komponenten das Blau oder das Grün vorherrscht. Kommt ferner bei einer anderen Farbstoffschicht zu der Mischung von Blau und Grün auch noch ein Teil des Gelb des Spektrums hinzu, das ja nach Tabelle III komplementär zu einem Teil des Blau ist, d. h. mit diesem zusammen Weiß ergibt, so muß dadurch die Gesamtfarbe zunächst einen weißlichen Ton erhalten, und zwar wird diese Farbenänderung hauptsächlich auf Kosten des durch seine Komplementärfarbe vernichteten Blau gehen, so daß demnach der Farbenumschlag außer zum Weiß auch gleichzeitig zum Grün hin gehen wird, und wir also schließlich ein Hellgrün erhalten.

In ähnlicher Weise ergeben sich auch die bei der Mischung der übrigen Spektralbezirke des Spektrums zu erhaltendes

Digitized by Google

Farbeneindrücke. Immerhin ist aber bei diesen Farbenmischungen noch zu berücksichtigen, daß das Helligkeitsverhältnis der einzelnen zur Mischung gelangenden Spektralfarben im praktischen Leben häufig ein ganz anderes ist als wir es im Sonnenspektrum selbst vorfinden, da nämlich die einzelnen Strahlen derselben in den verschiedenen Stoffen meist in ganz verschiedener Stärke geschwächt werden. In dieser Beziehung gilt nun als Regel, daß der Farbenton derjenigen Komponenten, deren Helligkeit die größere ist, auch in der Mischung entsprechend mehr hervortritt. Handelt es sich also z. B. um zwei komplementäre Wellenlängen, so wird dann die Mischung nicht mehr reines Weiß ergeben sondern ein solches mit einem Stich in die Farbe der relativ helleren Wellenlänge. Wenn ferner zwei komplementäre Strahlen des Spektrums zwar in richtigem Stärkeverhältnis, aber doch beide nur mit sehr geringer Intensität zur Mischung gelangen, so wird der Eindruck, welchen das Auge dabei erhält, als Grau bezeichnet, eine Farbe, die natürlich auch z. B. dann entsteht, wenn alle Farben des Spektrums zusammen in stark abgeschwächter Intensität zur Wirkung kommen. Grau ist also nichts anderes als ein lichtschwaches Weiß. Wiegt jedoch bei einer solchen Mischung von lichtschwachen Farbenstrahlen z. B. die rote Seite des Spektrums vor der andern vor, so spricht man von Braun mit den Unterabteilungen Rotbraun oder Gelbbraun, je nachdem hierbei das Rot oder das Gelb in den Vordergrund tritt. Hat dagegen in dem lichtschwachen Weiß die kurzwellige Seite des Spektrums die relativ größere Intensität, so redet man von Blaugrau oder Stahlgrau. Ein Grau mit vorherrschendem Grün ferner heißt Olivengrün. Bei vollkommenem Fehlen der Lichtwirkung endlich entsteht der Eindruck des Schwarzen.

Weiteres über die Farbenmischung findet man übrigens auch noch im nächsten Abschnitt unter den Körperfarben.

2. Die Körperfarben. Die Körperfarben stellen die einfachste und gewöhnlichste Art der Farben dar. Es gehören hierzu nämlich nicht bloß die sämtlichen Farben der Blätter und der Blüten der Pflanzenwelt sondern auch die meisten Farben der Tierwelt, sowie vor allem auch die der vielen, künstlich gefärbten Gegenstände. Auch jene Farben der organischen Welt rühren nämlich ebenso wie die dieser künstlich gefärbten Gegenstände von sogenannten Farbstoffen her, so daß man also die Körperfarben auch als „Farbstofffarben" bezeichnen kann.

Die Fähigkeit, auf das menschliche Auge den Eindruck einer Farbe hervorzurufen, erlangt nun ein solcher Farbstoff durch die Eigenschaft, daß beim Durchgang des Lichtes durch ihn ein Teil der Strahlen des sichtbaren Spektrums mehr oder weniger absorbiert, d. h. ausgelöscht, ein anderer Teil dagegen nahezu ungeschwächt hindurchgelassen wird. Am besten lernt man die Eigenschaften eines solchen Stoffes kennen, wenn man ihn in einem geeigneten Lösungsmittel (Wasser, Alkohol, Aether, Aceton oder dgl.) auflöst, dann die Lösung in geeigneter Konzentration in ein sogenanntes Absorptionsgefäß, d. h. ein Gefäß mit zwei sich gegenüberstehenden Wänden aus farblosen Spiegelglasplatten bringt, und durch dieses dann die Strahlung einer Lichtquelle schickt, deren Spektrum die einzelnen Farben möglichst in dem gleichen Helligkeitsverhältnis enthält wie das der Sonne; und zwar kommt zu diesem Zwecke neben dem Sonnenlicht selbst von den künstlichen Lichtquellen besonders der Nernstbrenner sowie die Acetylenlampe in Frage. Allenfalls genügt aber auch das Licht einer gewöhnlichen elektrischen Glühlampe, eines Auerbrenners oder auch einer Petroleumlampe.

Das durch die Lösung hindurchgegangene Licht wird dann mit dem Spalt eines Spektroskopes aufgefangen, und dann in diesem Instrument die Verteilung der Absorption auf die verschiedenen Farben des Spektrums beobachtet.

Will man die Farbe des gefärbten Gegenstandes selbst in dieser Weise analysieren, so beleuchtet man ihn möglichst hell mit einer der genannten Lichtquellen und richtet dann das Spaltrohr des Spektroskops so auf ihn, daß in letzteres nur das diffus zerstreute, nicht aber das oberflächlich von ihm reflektierte Licht hineingelangt, da nämlich dieses, wie wir im nächsten Abschnitt sehen werden, meistens nahezu die gleiche Farbe zeigt wie das auffallende Licht und daher die eigentliche Körperfarbe des Gegenstandes stets mehr oder weniger verdeckt. Bei durchsichtigen oder durchscheinenden Gegenständen (gefärbten Gläsern, Papieren, Laub- und Blütenblättern, Zeugstoffen usw.) ist es häufig vorteilhafter, das durch den Stoff hindurchgegangene Licht zu analysieren.

Zur genaueren zahlenmäßigen Bestimmung der Absorption der verschiedenen Wellenlängen des Spektrums in einem bestimmten Farbstoff ferner benutzt man an Stelle des Spektroskops ein sogenanntes Spektralphotometer, wie es z. B. von Vierordt angegeben ist. Dessen Instrument unterscheidet sich von einem gewöhnlichen Spektroskop in der Hauptsache nur dadurch, daß daran statt eines Spaltes deren zwei an-

Digitized by Google

gebracht sind, die unmittelbar nebeneinander in derselben Vertikalen liegen, und von denen jeder seine besondere Mikrometerschraube hat, um damit die beiden Spaltbreiten genau messen zu können. Vor dem einen dieser beiden Spalte wird nun die zu untersuchende Farbstofflösung in bestimmter Konzentration und Schichtdicke angebracht, während durch den anderen das Licht der zur Untersuchung dienenden Lichtquelle frei hindurchgeht. Zunächst wird dann die Breite des ersteren Spaltes passend eingestellt, und nun die des anderen so weit verringert, bis die Helligkeit der von beiden den Spalten herrührenden Spektren, die natürlich im Okular des Apparates unmittelbar übereinander gesehen werden, an der in Frage kommenden Spektralstelle die gleiche ist. Aus dem Verhältnis der beiden Spaltbreiten ergibt sich dann ohne weiteres der Wert des zu messenden „Absorptionskoeffizienten" der Lösung für den in Frage kommenden Spektralbezirk. Näheres über dieses und andere Spektralphotometer muß in den betreffenden Spezialwerken nachgesehen werden. Auf die Bedeutung des Absorptionskoeffizienten wird übrigens am Schlusse dieses Abschnittes noch etwas näher eingegangen werden, da wir dieser Größe auch noch im folgenden Abschnitt wieder begegnen werden.

Schon die einfache spektroskopische Beobachtung des Absorptionsspektrums eines Farbstoffes genügt nun aber, um über die allgemeinen, für die Theorie der Körperfarben in Frage kommenden Gesichtspunkte Aufschluß zu geben. Sie zeigt nämlich zunächst, daß ein Farbstoff diejenigen Wellen des Spektrums, deren Farbe er aufweist, stets nahezu ungeschwächt hindurchläßt, vor allem aber auch, daß er die zu seiner Eigenfarbe komplementären Wellenlängen stets mehr oder weniger stark absorbiert. Diese letztere Eigenschaft ist fast noch wichtiger als die erstere; denn es lassen z. B. die meisten gelben Farbstoffe außer den gelben Strahlen des Spektrums auch den größten Teil des Rot oder Grün noch mehr oder weniger gut durch, dagegen haben alle gelben Farbstoffe die Eigenschaft, daß sie das dem Gelb komplementäre Blau absorbieren. Das Charakteristische eines Farbstoffes ist daher im Grunde genommen nicht die Art der von ihm durchgelassenen, sondern die der von ihm absorbierten Wellen des Spektrums oder mit anderen Worten: die Lage und Breite des dunklen Absorptionsstreifens in seinem Absorptionsspektrum.

Ein solcher gelber Farbstoff, der außer den gelben auch die grünen und roten Strahlen des Spektrums nahezu ungeschwächt hindurchläßt, zeigt nun allerdings eine hellgelbe, d. h. eine mit Weiß gemischte gelbe Farbe; denn nach den im ersten Abschnitt gegebenen Regeln über die Mischung von Farbeneindrücken im Auge ergänzen sich das vom Farbstoff gleichfalls durchgelassene Grün und Rot annähernd zu Weiß. Ist dagegen die Absorption des Grün hierbei stärker als die des Rot, so wird der Ton der Farbstofffarbe ins Rötliche und im umgekehrten Falle ins Grünliche schlagen. Wird jedoch die eine dieser beiden Farben hierbei — ebenso wie das Blau — vollständig absorbiert, die andere dagegen — ebenso wie das Gelb — vollständig durchgelassen, so haben wir es schließlich mit einem ausgesprochenen Rotgelb bezw. Grüngelb zu tun.

Bei denjenigen Farbstoffen, welche eine rote Farbe zeigen, erstreckt sich die Absorption des Stoffes in erster Linie natürlich wieder über das zum Rot komplementäre Grün, und, wenn dann zugleich mit dem Rot auch noch das Gelb und Blau gut durchgelassen werden, so haben wir es wieder mit einem Hellrot zu tun, da sich ja Gelb und Blau zu Weiß ergänzen. Wird jedoch von den letzteren beiden Farben hierbei das Blau stärker absorbiert als das Gelb, so muß der Ton der Farbe gelbrot (ziegelrot) sein; ist das Umgekehrte der Fall, so haben wir Rosa, d. h. ein Rot vor uns, welches einen Stich ins Blaue zeigt. Ein roter Farbstoff endlich, der nur die roten Strahlen des Spektrums gut durchläßt, alle anderen Farben desselben aber absorbiert, zeigt natürlich ein gesättigtes Rot (Blutrot).

Die grünen Farbstoffe absorbieren stets sowohl das rote wie das violette Ende des Spektrums, da ja diese beiden Spektralbezirke zugleich das Komplement des Grün bilden; sie können demnach außer dem Grün höchstens noch Gelb und Blau durchlassen, die zusammen wieder Weiß ergeben; und in diesem Falle handelt es sich dann wieder um ein Hellgrün. Wird ferner — außer dem Grün — nur noch die eine dieser beiden Farben gut durchgelassen, so haben wir es ähnlich wie oben mit Gelbgrün oder Blaugrün zu tun.

Die blauen Farbstoffe endlich zeigen stets eine kräftige Absorption des Gelb, so daß also außer dem Blau eventuell auch noch das Rot und das Grün von ihnen durchgelassen werden kann, was auch in diesem Falle wieder Hellblau liefert. Fehlt dagegen in dem Absorptionsspektrum außer dem Gelb auch noch der größte Teil des Rot, so erhalten wir Grünblau, und wenn statt des Rot das Grün absorbiert wird, so ergibt sich Rotblau, eine Farbe, die gewöhnlich mit Lila oder auch vielfach mit Violett bezeichnet wird, da sie mit der

Digitized by Google

diesen Namen tragenden Farbe der kürzesten Wellen des sichtbaren Spektrums tatsächlich eine gewisse Aehnlichkeit besitzt.

Derjenige Teil dieser Darlegungen, welcher sich auf die Zusammensetzung der als Hellrot, Hellgelb usw. bezeichneten Farben bezieht und welcher nicht bloß für die Farben der Farbstoffe, sondern ganz allgemein gilt, ist in folgender Tabelle IV noch besonders zusammengestellt, da er für die sogleich folgenden Betrachtungen über die Mischung von Farbstoffen von Bedeutung ist.

Tabelle IV.

Es besteht	Hellrot	Hellgelb	Hellgrün	Hellblau
aus	Rot Gelb Blau	Rot Gelb Grün	Gelb Grün Blau	Rot Grün Blau

Wenden wir uns nun zu denjenigen Farbeneindrücken, welche sich bei der Mischung zweier oder mehrerer Farbstoffe ergeben, so ist hier zunächst noch einmal zu betonen, daß eine Mischung von Farbstoffen etwas ganz anderes darstellt, als eine solche von Farben, d. h. Farbstrahlen, wie sie im ersten Kapitel betrachtet wurde. Während es sich nämlich dort für das Auge stets um eine Addition von Farbeneindrücken handelte, findet bei der Mischung von Farbstoffen stets eine Subtraktion solcher Eindrücke statt, denn jeder der Farbstoffe absorbiert von dem auffallenden weißen Licht einen bestimmten Teil, so daß also die Mischung stets mehr Licht absorbiert, d. h. mehr von dem auffallenden Lichte wegnimmt als jeder der Stoffe für sich allein. Darum spricht man denn auch hier von einer Subtraktionsfarbe, bei der Mischung von Farbstrahlen dagegen von einer Additionsfarbe. Mischen wir also einen roten Farbstoff, welcher nur die grünen Strahlen des Spektrums absorbiert, und welcher also nach den früheren Darlegungen eine hellrote Farbe zeigt, mit einem solchen, welcher nur Blau absorbiert, und also hellgelb aussieht, so wird die Mischung beider sowohl die grünen wie die blauen Strahlen auslöschen, und das von ihnen beiden zusammen durchgelassene Licht wird daher nicht bloß eine andere Farbe haben als das von jedem allein durchgelassene, sondern auch stets dunkler sein als diese, während die bei der Mischung zweier Farbstrahlen entstehende Mischfarbe stets heller ist als jede der Komponenten.

Was die bei der Mischung von Farbstoffen zu erwartende Farbe der Mischung angeht, so ist zunächst klar, daß zwei Farbstoffe, von denen jeder nur eine Farbe des Spektrums, also der eine z. B. nur Rot und der andere nur Blau, durchläßt, bei ihrer Vermischung überhaupt kein Licht mehr durchlassen können, da ja der eine dann stets das von dem anderen noch durchgelassene Licht verschluckt. Die Farbe der Mischung muß demnach in diesem Falle schwarz sein.

Mischt man zwei Farbstoffe, von denen jeder für sich je zwei Farbenregionen des Spektrums durchläßt, d. h. also eine Mischfarbe der beiden Regionen zeigt, so wird die Farbe der Mischung auch dann noch in zwei Fällen Schwarz sein, nämlich dann, wenn die hier in Frage kommenden vier Regionen des Spektrums sämtlich verschieden voneinander sind. Dies ist zunächst der Fall, wenn man einen rotgelben Farbstoff mit einem blaugrünen, und ferner auch. wenn man einen rotblauen mit einem grüngelben mischt; denn in beiden Fällen absorbiert der eine der beiden Stoffe wieder gerade die von dem anderen noch durchgelassenen Wellen. In den vier anderen hier noch möglichen Fällen dagegen erhält man bei der Mischung zweier solcher Farbstoffe nicht mehr Schwarz, sondern eine reine Spektralfarbe, und zwar offenbar diejenige, welche von den beiden gemischten Farbstoffen gemeinsam durchgelassen wird. Die Vermischung eines rotgelben Farbstoffes mit einem grüngelben gibt nämlich Gelb, die eines rotgelben mit einem rotblauen Rot, die eines gelbgrünen mit einem grünblauen Grün und die eines grünblauen mit einem rotblauen schließlich Blau.

Was die Mischung solcher Farbstoffe angeht, von denen jeder für sich drei Farbenbezirke des Spektrums durchläßt, und die, wie wir oben gesehen haben, entweder Hellrot, Hellgelb, Hellgrün oder Hellblau zeigen müssen, so erhält man jetzt, solange man nur zwei dieser Stoffe mischt, überhaupt kein Schwarz mehr, da die Mischung in diesem Falle, wie aus der Tabelle IV folgt, stets zwei Farbenbezirke des Spektrums durchläßt, die in der folgenden Tabelle V zusammengestellt sind.

Digitized by Google

Tabelle V.

Gemische Farbstoffe	Mischfarbe
Hellrot + Hellgelb	Rotgelb
Hellrot + Hellgrün	Gelbblau = Weiß
Hellrot + Hellblau	Rotblau
Hellgelb + Hellgrün	Gelbgrün
Hellgelb + Hellblau	Rotgrün = Weiß
Hellgrün + Hellblau	Grünblau

Hier ergibt sich also bei der Mischung wieder nur in vier Fällen ein wirklicher Farbstoff, in den beiden anderen dagegen Weiß, das allerdings, da es sich ja hier um Subtraktionsfarben handelt, nur ziemlich lichtschwach und also mehr ein Grau sein wird.

Außer den betrachteten Farbstoffmischungen kommen noch solche in Betracht, wo man je einen der zuletzt betrachteten d. h. also je drei Spektralbezirke durchlassenden Farbstoffe mit je einem der früher besprochenen, d. h. also entweder nur je eine oder je zwei Bezirke durchlassenden, mischt.

In dem ersteren dieser beiden Fälle kann sich nun bei der Mischung offenbar nur entweder Schwarz oder diejenige Mischfarbe ergeben, welche der nur die eine Spektralfarbe durchlassende Stoff zeigt; und zwar ergibt sich wieder aus der Tabelle IV, daß zunächst das erstere in 4 Fällen auftreten muß, nämlich bei der Mischung von Hellrot mit Grün, von Hellgelb mit Blau, von Hellgrün mit Rot und von Hellblau mit Gelb; denn in allen diesen Fällen absorbiert der eine der beiden Farbstoffe immer gerade die von dem anderen durchgelassenen Spektralbezirke. Es entsteht demnach hier Schwarz durch die Mischung von je zwei Farbstoffen, deren Farben, wenn sie additiv gemischt würden, gerade im Gegenteil Weiß liefern würden, d. h. komplementär zueinander sind; hier tritt also der Unterschied der Additions- und der Subtraktionsfarben in schroffster Weise in die Erscheinung.

Weiter ergeben sich nach Tabelle IV 12 Fälle, wo sich bei der Mischung eines der darin gekennzeichneten vier für je drei Spektralbezirke durchlässigen Farbstoffe, mit je einem nur einen solchen Bezirk durchlassenden Stoff eine wirkliche Farbe bildet, nämlich bei der Mischung von Hellrot mit Rot, Gelb oder Blau, von Hellgelb mit Rot, Gelb oder Grün, von Hellgrün mit Gelb, Grün oder Blau und schließlich von Hellblau mit Rot, Grün oder Blau. Die entstehende Mischfarbe ist natürlich in allen diesen Fällen diejenige des zuletzt genannten, nur einen Spektralbezirk durchlassenden Farbstoffs, und eine solche Mischung wird daher im allgemeinen wenig Zweck haben.

Endlich bleiben uns dann noch diejenigen Farbeneindrücke übrig, welche sich bei der Mischung eines je drei und eines je zwei Farbenbezirke des Spektrums durchlassenden Farbstoffes ergeben. Von diesen sind die ersteren durch die Tabelle IV gekennzeichnet, während die letzteren durch die vier Mischfarben Rotgelb (Orange), Gelbgrün, Grünblau und Rotblau (Lila) dargestellt werden. Bei den letzteren ergeben sich die von jedem Farbstoff durchgelassenen Spektralbezirke unmittelbar aus ihrem Namen, und die Zusammenstellung dieser Durchlaßfarben mit denjenigen der Tabelle IV zeigt dann, daß sich bei der Mischung zunächst in 8 Fällen einfach die Farbe des zwei Spektralbezirke durchlassenden Farbstoffs ergeben muß, nämlich Rotgelb bei der Mischung von Rotgelb mit Hellrot oder Hellgelb, Gelbgrün bei der Mischung von Gelbgrün mit Hellgelb oder Hellgrün usw. Auch diese Farbstoffmischungen bieten deshalb, da sie ja stets nahezu unverändert die Farbe der einen Komponente zeigen müssen, kein besonderes Interesse. Wesentlich anders dagegen verhält es sich mit den 8 Mischungen, deren Resultat in der folgenden Tabelle VI zusammengestellt ist, die sich wieder sehr einfach auf Grund der Angaben derTabelle IV ergibt.

Tabelle VI.

Gemischte Farbstoffe	Mischfarbe
Rotgelb + Hellgrün	Gelb
Rotgelb + Hellblau	Rot
Grüngelb + Hellrot	Gelb
Grüngelb + Hellblau	Grün
Grünblau + Hellrot	Blau
Grünblau + Hellgelb	Grün
Rotblau + Hellgelb	Rot
Rotblau + Hellgrün	Blau

Bemerkenswert ist bei diesen Mischungen zunächst, daß die Mischfarbe stets eine reine Spektralfarbe ist, und ferner auch noch, daß diese resultierende Farbe in der einen der beiden Komponenten — der in der Tabelle zu zweit stehenden nämlich — überhaupt nicht enthalten zu sein scheint. Das letztere erklärt sich natürlich einfach daraus, daß sie hier jedesmal durch ihre Komplementärfarbe verdeckt wird.

Bei allen diesen Farbstoffmischungen ist nun allerdings zu bedenken, daß es Farbstoffe, welche ein, zwei oder drei

Digitized by Google

Regionen des Spektrums — und nur diese — absorbieren, überhaupt nicht gibt, sondern daß die meisten dieser Stoffe, wie das Spektroskop lehrt, an einer bestimmten Stelle des Spektrums ihr Absorptionsmaximum besitzen, und daß von hier aus die Absorption nach beiden Seiten hin allmählich abnimmt, und zwar erstreckt sie sich von jenem Maximum aus gewöhnlich um so weiter über die benachbarten Spektralbezirke hin, je konzentrierter und je dicker die in Frage kommende Farbstoffschicht ist. Schwach konzentrierte Lösungen eines Farbstoffes andererseits absorbieren oft nur verhältnismäßig kleine Teile des zu ihrer Körperfarbe gehörigen komplementären Farbenbezirks des Spektrums, so daß dann bei der Vermischung des Stoffes mit anderen Farbstoffen die übrigbleibenden Teile dieses Bezirks in der Mischfarbe noch sehr deutlich zum Vorschein kommen, und daher diese von der nach den oben gegebenen Regeln zu erwartenden oft nicht unbeträchtlich abweicht. Einen vollkommen genauen Aufschluß über die bei der Mischung von Farbstoffen zu erhaltende Mischfarbe kann daher nur die spektroskopische Untersuchung des von jedem der Stoffe durchgelassenen Lichtes ergeben; und es gilt dann die Regel, daß die Mischfarbe sich aus allen denjenigen Wellen des Spektrums in demjenigen Intensitätsverhältnis zusammensetzt, wie es übrig bleibt, wenn das zur Beobachtung verwandte Licht nacheinander durch die sämtlichen miteinander gemischten Stoffe gegangen ist.

Da nun aber schon die Zahl der Farbstoffe mit einer bestimmten Körperfarbe eine sehr große ist, da ferner die meisten dieser die gleiche Farbe zeigenden Stoffe trotzdem ein ziemlich verschiedenes Absorptionsspektrum zeigen können, und da endlich bei einer Mischung mehrerer Farbstoffe nicht bloß jeder einzelne Komponent in beliebiger Konzentration, sondern auch die Komponenten selbst noch wieder in beliebigem Verhältnis zueinander gemischt werden können, so ergibt sich demnach aus allem diesem, daß die Zahl der auf diese Weise herzustellenden Farbentöne geradezu mehrfach unendlich sein muß; und dies beweist ja auch die ganz gewaltige Fülle der Farbenarten, die die Gegenstände des täglichen Lebens uns darbieten.

Der Färber aber, der diese Farbeneindrücke erzeugen, oder der Maler, der sie nachahmen will, wird bei seinen Farbstoffmischungen stets am sichersten an der Hand des Spektroskopes arbeiten, und die oben angegebenen Regeln sind daher auch nur zur allgemeinen Uebersicht bestimmt.

Als ein besonders interessantes Beispiel der Mischung von Farbstoffen sei hier diejenige etwas näher betrachtet, welche bei dem sogenannten Dreifarbendruck zustande kommt. Die drei dabei zur Verwendung kommenden Farben sind in Figur 1

Fig. 1.

zum Teil neben- und zum Teil übereinander gedruckt, und man sieht, daß es sich dabei — oberflächlich betrachtet — um Rot, Gelb und Blau handelt. Jeder dieser drei Farbstoffe läßt nun aber nicht etwa bloß den seiner Farbe entsprechenden Farbenbezirk des Spektrums durch; denn dann müßte, wie wir oben gesehen haben, schon der Uebereinanderdruck je zweier derselben ein vollkommenes Schwarz ergeben, und es wäre also damit weder die Wiedergabe irgendeiner Mischfarbe noch auch die der vierten Hauptfarbe des Spektrums, des Grün nämlich, möglich. Bei genauerem Hinsehen sieht man denn auch, daß die drei Farben der Figur 1 als Hellrot, Hellgelb und Grünblau zu bezeichnen sind, und aus den obigen Darlegungen folgt dann zunächst — und die Figur 1 bestätigt es auch —, daß der Uebereinanderdruck des Hellrot und des Hellgelb ein Gelbrot und der des Grünblau und des Hellgelb ein reines Grün liefern muß, Farben, die natürlich, da es sich um Subtraktionsfarben handelt, beide dunkler sind als jede der Mischfarben für sich allein. Die Mischung von Hellrot und Grünblau ferner liefert nach Tabelle VI ein dunkles Blau, das jedoch in dem Falle, wo der letztere Farbstoff etwas schwächer aufgetragen wird, einen Stich ins Rötliche erhält und dann als Lila erscheint. In ähnlicher Weise lassen sich auch alle übrigen Farbentöne zwischen Rot und Gelb und Gelb und Blau durch mehr oder weniger starkes Auftragen einer der beiden in Frage kommenden Mischfarben erzeugen.

Digitized by Google

Der Uebereinanderdruck der sämtlichen drei Farben der Figur 1 erzeugt, wie die Figur zeigt, ein vollkommenes Schwarz, was sich theoretisch z. B. in der Weise ergibt, daß das Grün, welches aus der Mischung des Hellgelb und Grünblau entsteht, durch das dann noch hinzugefügte Hellrot vollkommen ausgelöscht werden muß, da das Absorptionsmaximum eines hellroten Farbstoffes stets im Grün liegt. Bei weniger starkem Auftrag der drei Farben wird, wenn alle drei im gleichen Verhältnis abgeschwächt werden, die Mischfarbe Grau, das beim stärkeren Auftrag einer der drei Farben natürlich den Ton dieser Farbe annimmt, so daß sich auf diese Weise also auch die weniger ausgesprochenen Farbentöne ziemlich naturgetreu wiedergeben lassen.

Als Gegensatz zu diesen Mischungen von Farbstoffen mögen sodann auch noch einige nicht minder wichtige Mischungen von Farben, d. h. Farbeneindrücken besprochen werden, nämlich einerseits diejenigen, welche beim Newtonschen Kreisel, und andererseits die, welche bei dem Lumièreschen Autochromverfahren zustande kommen. Denn wenn auch in diesen beiden Fällen zur Farbenmischung ebenfalls Farbstoffe benutzt werden — beim Kreisel nämlich zur Färbung der einzelnen Sektoren der rotierenden Pappscheibe und bei den Autochromplatten zur Färbung der darin gleichmäßig verteilten roten, grünen und blauen Stärkekörner —, so handelt es sich doch in diesen beiden Fällen nicht wie oben um eine Uebereinanderlagerung der betreffenden Farbstoffe, sondern um eine Nebeneinanderlagerung derselben, so daß hier also nicht ihre Subtraktions-, sondern ihre Additionsfarbe zur Geltung kommt. So geben z. B. ein blaues und ein gelbes Stärkekörnchen, die in der Autochromplatte unmittelbar nebeneinander liegen, zusammen nicht den Eindruck des Grün, wie sie ihn geben würden, wenn sie hintereinander in der Platte lägen, sondern den des Weiß; und ebenso vermischen sich auch bei einer rotierenden Newtonschen Scheibe, die zur Hälfte gelb und zur Hälfte blau gestrichen ist, diese beiden Farben im Auge des Beobachters zu Weiß. Diese letztere Farbe kann allerdings in beiden Fällen nicht so hell sein, wie dasjenige Weiß, welches das Auge sehen würde, wenn die betreffenden Farbstoffe nicht vorhanden wären, d. h. wenn die Autochromplatte klar durchsichtig, und wenn die Newtonsche Scheibe rein weiß wäre; denn jeder der Farbstoffe nimmt natürlich einen Teil des auffallenden weißen Lichtes fort. Das Weiß der Autochromplatte sowohl wie das des Newtonschen Kreisels wird daher stets etwas ins Grau spielen zumal, wenn man unmittelbar neben die gefärbte Platte bezw. Scheibe eine ungefärbte bringt und beide mit der gleichen Lichtquelle beleuchtet.

Im allgemeinen ist schließlich zu den Körperfarben noch zu erwähnen, daß man die Farbe eines Farbstoffes in zweierlei Weise zur Geltung bringen kann: entweder nämlich überzieht man die zu färbenden Stoffe nur mit einer dünnen und durchsichtigen Schicht desselben, so daß dann die Struktur der Stoffe selbst noch durch die Farbstoffschicht hindurch sichtbar ist, oder man trägt den Farbstoff so dick auf, daß diese Struktur verschwindet. Im ersten Falle spricht man von einer „Lackfarbe“, im zweiten von einer „Deckfarbe“. Bei jener muß der zu färbende Stoff, wenn die Farbe des Farbstoffes rein zur Geltung kommen soll, im ungefärbten Zustande entweder vollkommen durchsichtig oder vollkommen weiß erscheinen, da sonst die Farbe des Farbstoffes mit der des Stoffes selbst eine Mischfarbe ergibt. Ein weißer Stoff ist nämlich ein solcher, welcher sich aus einer Unzahl mikroskopisch kleiner Fäserchen, Bläschen oder dergleichen zusammensetzt, von denen jedes einzelne für sich vollkommen durchsichtig ist; denn dann wird eben das auffallende weiße Licht an den einzelnen Teilchen durch sogenannte diffuse Reflexion nach allen Seiten hin gleichmäßig zerstreut — und zwar alle Farben desselben in nahezu gleicher Stärke, so daß also der Stoff in der Farbe des auffallenden Lichtes erscheint, d. h. weiß, wenn dieses selbst weiß ist. Taucht man dagegen einen solchen weißen Körper in eine Farbstofflösung, so durchtränkt diese die Wandungen der einzelnen Fasern wie eine Gelatinefolie, und das diese Wandungen durchsetzende und dann ins Auge zurückgeworfene Licht muß demnach die Farbe des Farbstoffes zeigen.

Mit Rücksicht auf die Unterscheidung einer Körperfarbe von den weiter unten zu betrachtenden Farbenarten ist hier ferner noch zu erwähnen, daß die erstere ihren Farbenton weder mit dem Einfallswinkel des zur Beobachtung benutzten Lichtes noch mit der Art der Polarisation desselben ändert. Wenn allerdings die äußere Oberfläche des Stoffes vollkommen eben ist, so daß sie das Licht wie ein Spiegel zurückwirft, so kann bei bestimmten Beobachtungswinkeln dieses oberflächlich reflektierte Licht die Körperfarbe des Farbstoffes verdecken, wie beispielsweise ein glatt gehobeltes, gefärbtes und dann mit Firnis überzogenes Stück Holz unter gewissen Winkeln wie ein farbloses Stück Spiegelglas erscheint.

Schließlich ist hier noch anzuführen, daß die Körperfarbe ihren Farbenton auch dann

Digitized by Google

nicht ändert, wenn man den gefärbten Stoff in ein Medium mit anderem Brechungsexponenten bringt, d. h. wenn das einfallende Licht statt aus der Luft aus Wasser, Firnis oder dergleichen auf die gefärbte Schicht fällt. Voraussetzung ist dabei aber natürlich, daß diese Medien selbst nicht gefärbt sind, d. h. daß die einzelnen Farbenstrahlen des zur Beobachtung dienenden weißen Lichtes auf ihrem Wege von der Lichtquelle zum Farbstoff und von diesem zum Auge durch das den Farbstoff umgebende Medium nicht in ungleichem Grade absorbiert werden.

3. **Die Oberflächenfarben.** Als Oberflächenfarbe bezeichnet man in der Physik eine Farbe, welche unmittelbar an der Oberfläche eines Stoffes und zwar lediglich deswegen entsteht, weil die verschiedenen Farben des Spektrums an ihr verschieden stark reflektiert werden. Man könnte deswegen diese Farben auch ebenso richtig als „Reflexionsfarben“ bezeichnen. Eine besondere Struktur der Oberfläche ist also für das Zustandekommen einer Oberflächenfarbe nicht erforderlich, sondern diese kommt vielmehr gerade dann am besten zur Geltung, wenn jene Fläche so glatt wie möglich ist.

Die bekanntesten Beispiele der Oberflächenfarbe sind diejenigen gewisser Metalle wie des Kupfers und des Goldes, und man bezeichnet daher diese Farbenart auch vielfach als Metallfarbe. Dieser Name ist indessen insofern nicht berechtigt, als die Oberflächenfarbe bei den Metallen — aus Gründen, die wir sogleich kennen lernen werden — nicht die Regel sondern die Ausnahme bildet; und tatsächlich haben wir denn auch die eigentlichen Stoffe mit Oberflächenfarben nicht hier sondern bei den Farbstoffen zu suchen. Es sind nämlich zumal die sehr stark färbenden, d. h. also die einen Teil der Strahlen des Spektrums sehr stark absorbierenden Stoffe dieser Art, wie z. B. das Fuchsin, das Diamantgrün usw., welche eine besonders ausgesprochene Oberflächenfarbe zeigen — und zwar auch nur in festem Zustande. Die Oberfläche eines Fuchsinkristalles z. B. schillert in einem prächtig grünen Farbenglanz, eine Eigenschaft, die um so mehr auffällt, als dieser Farbstoff bekanntlich beim Lösen in Alkohol oder dergleichen eine ausgesprochen rote Körperfarbe zeigt.

Noch schöner allerdings treten die Oberflächenfarben dieser Stoffe hervor, wenn man eine größere spiegelnde Fläche davon herstellt, was z. B. in der Weise zu erreichen ist, daß man eine konzentrierte Lösung des Farbstoffes in heißem Alkohol herstellt und die noch heiße Lösung über eine ebenfalls heiß gemachte und schräg gehaltene Glasplatte gießt, so daß das Lösungsmittel möglichst schnell verdunsten kann. Die zurückbleibende Farbstoffschicht zeigt dann, von der Luftseite her gesehen, beim Fuchsin eine starke gelbgrüne, beim Diamantgrün eine schön kirschrote, dagegen von der Glasseite aus betrachtet, beim einen eine blaugrüne, beim andern eine gelbbraune Oberflächenfarbe. Allerdings ist der Glanz, d. h. die Stärke des reflektierten Lichtes, bei diesen eigentlichen Stoffen mit Oberflächenfarben erheblich geringer als bei den Metallen, hinsichtlich der Farbensättigung dagegen verhält es sich gerade umgekehrt; und der Grund dafür ist nun auch leicht einzusehen.

Die Tatsache nämlich, daß das Licht von den Metallen so stark reflektiert wird, rührt in erster Linie daher, daß dasselbe von ihnen in so ganz ungewöhnlich starkem Grade absorbiert wird, in viel stärkerem nämlich als selbst in dem Absorptionsmaximum eines jener stark absorbierenden Farbstoffe. Andererseits hat aber ein Stoff der letzteren Art wieder das vor den Metallen voraus, daß er nicht wie diese alle Strahlen des Spektrums in nahezu gleicher Stärke absorbiert und sie daher auch nicht alle in nahezu gleicher Stärke reflektiert. In bezug auf diejenigen dieser Strahlen nämlich, die von dem Farbstoff nahezu ungeschwächt hindurchgelassen werden, muß er sich ähnlich wie ein gewöhnlicher farbloser Körper, also z. B. wie Wasser oder Glas, verhalten, und diese Strahlen werden daher auch von ihm ebenso wie von diesen letzteren Stoffen nur in schwachem Maße reflektiert.

Gerade dieser Umstand aber, daß ein solcher Farbstoff einen Teil der Strahlen des Spektrums sehr stark — fast so stark wie ein Metall — und einen anderen Teil davon sehr schwach — fast so schwach wie ein gewöhnlicher farbloser Stoff — reflektiert, bedingt nun die große Sättigung der Oberflächenfarbe dieser Stoffe; denn eine Farbe wird natürlich um so reiner, je größer die Unterschiede sind, welche die Intensität der verschiedenen Spektralwellen des ursprünglich auffallenden weißen Lichtes bei dem die Farbe erzeugenden Prozesse erfährt.

Aus den obigen Darlegungen folgt nun weiter, daß die von einem stark absorbierenden Farbstoffe am stärksten reflektierten Strahlen diejenigen sind, welche er am stärksten absorbiert, so daß diese also auch in der Reflexionsfarbe vorherrschen müssen. In der Körperfarbe des betreffenden Stoffes treten dagegen umgekehrt gerade die von ihm durchgelassenen, d. h. schwach

Digitized by Google

oder gar nicht absorbierten Strahlen hervor, und somit ergibt sich hieraus die Regel, daß die Oberflächenfarbe eines stark absorbierenden Farbstoffes bis zu einem gewissen Grade zu seiner Körperfarbe komplementär sein muß, eine Tatsache, die denn auch schon seit 1852 als das Haidingersche Gesetz bekannt ist. Allerdings gilt dieses Gesetz nicht im genauen Sinne des Wortes komplementär; denn einesteils hängt die Körperfarbe eines Stoffes sehr wesentlich von der Dicke und der Konzentration der durchstrahlten Farbstoffschicht ab, Bedingungen, mit denen die Oberflächenfarbe nichts zu tun hat, und andererseits ändert diese sich wieder, wie wir später sehen werden, ganz erheblich sowohl mit dem Brechungsexponenten des angrenzenden Mediums wie auch mit dem Einfallswinkel und der Polarisationsart des auffallenden Lichtes, Größen, von denen wieder die Körperfarbe vollkommen unabhängig ist.

Als Beispiel sei hier nur angeführt, daß die Körperfarbe des Fuchsins mit der Dicke der in Frage kommenden Schicht vom hellsten Rosa bis zum tiefsten Rot wechselt, und daß andererseits die Oberflächenfarbe dieses Farbstoffes bei senkrechtem Einfall des Lichtes aus Luft gelbgrün, aus Glas blaugrün und aus Diamant rein blau ist. Diese letztere Farbe ist aber natürlich keineswegs mehr komplementär zu dem reinen Rot, welches die Körperfarbe einer etwas dickeren Fuchsinschicht darstellt. Wohl aber kann man sagen, daß das Blaugrün, welches eine auf Glas gegossene Fuchsinschicht, von der Glasseite aus gesehen, wiederspiegelt, annähernd komplementär ist zu dem Rosa, welches die Durchlaßfarbe einer sehr dünnen Schicht dieses Farbstoffes bildet, so daß also für diesen besonderen Fall das Haidingersche Gesetz tatsächlich zutrifft.

Nach dem Bisherigen dürfte es nun vielleicht scheinen, als ob die Vorgänge, welche sich bei der Reflexion des Lichtes an den Stoffen mit Oberflächenfarben abspielen, sehr verwickelter Natur seien. Dies ist indessen keineswegs der Fall; denn die Erscheinungen lassen sich hier sehr leicht übersehen und auch sogar bis in alle Einzelheiten hinein rechnerisch verfolgen, wenn man direkt auf die sehr einfachen und auch längst bekannten Formeln zurückgeht, welche für die Reflexion des Lichtes gelten. Nur insofern wird die Sache hier etwas verwickelter als bei den sonstigen Stoffen, weil hier zwei Arten von Formeln zu berücksichtigen sind, indem nämlich für diejenigen Strahlen, welche von einem solchen stark absorbierenden Farbstoff wenig oder gar nicht absorbiert werden, die für farblose Körper geltenden Fresnelschen Reflexionsformeln anzuwenden sind, während für die von dem Stoffe stark absorbierten Strahlen die für die sogenannte Metallreflexion gültigen, zuerst von Cauchy aufgestellten Formeln in Frage kommen.

Diese beiden Formeln lauten, wenn wir uns zunächst auf den senkrechten Einfall des Lichtes aus der Luft beschränken,

$$R_0 = \left(\frac{n-1}{n+1}\right)^2 \text{ (Fresnel)} \qquad 2)$$

und

$$R_0 = \frac{(n-1)^2 + k^2}{(n+1)^2 + k^2} \text{ (Cauchy).} \qquad 3)$$

Hierin bedeutet R_0 den reflektierten Bruchteil des einfallenden Lichtes für den Einfallswinkel Null, ferner n den Brechungsexponenten und endlich k, das nur in der Formel 3 vorkommt, den Absorptionskoeffizienten des betreffenden Stoffes für die in Frage kommende Lichtwelle. Beim Fuchsin z. B. gehört das ganze Rot bis zu etwa 630 $\mu\mu$ hin und das ganze Violett von etwa 430 $\mu\mu$ an zu den schwach absorbierten Strahlen, und auf diese ist demnach bei diesem Farbstoff einfach die Formel 2 anzuwenden. Das Gelb und Grün zwischen 590 und 450 $\mu\mu$ dagegen werden vom Fuchsin annähernd ebenso stark absorbiert wie von einem Metall; für diese Wellen gilt also die Formel 3. Als stark absorbiert im Sinne der Cauchyschen Theorie ist nämlich nur ein solcher Lichtstrahl anzusehen, der von dem in Frage kommenden Stoff schon in einer Schicht von der Dicke einer Lichtwellenlänge, d. h. also von etwa 0,0005 mm Dicke, eine namhafte Absorption erleidet; denn nach dieser Theorie wird der von einer solchen Schichtdicke bei senkrechtem Auffall des Lichtes durchgelassene Bruchteil der Intensität durch die Größe $e^{-4\pi k}$ dargestellt, wo e = 2,71828... die Basis des natürlichen Logarithmensystems und $\pi = 3,14159...$ die bekannte Ludolphsche Zahl bedeutet. Hieraus berechnet sich z. B., daß ein absorbierender Stoff, der von einem bestimmten Lichtstrahl in 1 mm dicker Schicht 89 % absorbiert, was doch schon eine recht kräftige Absorption bedeutet, im Sinne der Cauchyschen Theorie nur einen Absorptionskoeffizienten von 0,0001 hat, sodaß also in dieser Theorie eine solche Absorption — ja sogar eine viel stärkere — noch vollkommen vernachlässigt werden kann, d. h. daß ein solcher Strahl einfach als ein nicht absorbierter behandelt werden kann, für den also einfach die Fresnelsche Reflexions-

Digitized by Google

formel 2 gilt. Diese letztere ergibt sich ja übrigens auch, wie man sieht, unmittelbar aus der Cauchyschen Gleichung 3 für $k = 0$.

Geschieht der Einfall des Lichtes auf einen solchen Stoff nicht aus der Luft, sondern aus einem anderen Medium, so ist an Stelle des einfachen Brechungsexponenten n des Farbstoffes für die betreffende Wellenlänge das Verhältnis der Brechungsexponenten der beiden aneinander stoßenden Medien für diese Welle zu setzen, so daß demnach die Formeln 2 und 3, wenn wir den Brechungsexponenten des den Farbstoff umgebenden Mediums mit n_1 und den des Farbstoffes selbst mit n_2 bezeichnen, in

$$R_0 = \left(\frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1}\right)^2 \qquad 2a)$$

und

$$R_0 = \frac{(n_2 - n_1)^2 + n_1^2 k^2}{(n_2 + n_1)^2 + n_1^2 k^2} \qquad 3a)$$

übergehen. Die reflektierten Intensitäten werden also hier ganz andere als in dem Falle, wo der Farbstoff von Luft umgeben ist, und es leuchtet schon deswegen ein, daß die Reflexionsfarbe sich mit der Art des den Farbstoff umgebenden Mediums nicht unwesentlich ändern kann. Es kommt jedoch hier noch ein Umstand hinzu, welcher bewirkt, daß diese Veränderlichkeit in unserem Falle eine besonders starke wird: das ist die sogenannte anomale Dispersion dieser stark absorbierenden Farbstoffe.

Diese Erscheinung besteht darin, daß die Brechungsexponenten eines solchen Stoffes für diejenigen Wellenlängen, welche zu beiden Seiten seines Absorptionsmaximums liegen, im Vergleiche zu denjenigen anderer Stoffe ganz gewaltige Unterschiede in der Größe zeigen, obwohl es sich hierbei um Strahlen handelt, die im Sinne der Cauchyschen Theorie noch als nicht absorbierte angesehen werden können, und deren Verhalten man also in dieser Beziehung eher mit demjenigen bei den gewöhnlichen farblosen Körpern zu vergleichen geneigt sein würde. In Wirklichkeit liegen jedoch hier bei den Körpern mit Oberflächenfarben die Verhältnisse ganz anders als bei den farblosen Stoffen; denn während z. B. beim Schwefelkohlenstoff, der ja bekanntlich einen der stärkst dispergierenden unter den farblosen Stoffen darstellt, die Brechungsexponenten für die verschiedenen Strahlen des sichtbaren Spektrums sämtlich zwischen 1,6 und 1,7 liegen, und deswegen nach der Formel 2 ein erheblicher Unterschied in der Stärke des reflektierten Bruchteils hier nicht auftreten kann — tatsächlich zeigen ja auch alle diese farblosen Stoffe bei der gewöhnlichen Reflexion des Lichtes keine merkliche Oberflächenfarbe —, hat z. B. das Fuchsin für die violetten Strahlen in der Umgebung der Fraunhoferschen G-Linie ($\lambda = 431$) einen Brechungsexponenten, welcher mit demjenigen der atmosphärischen Luft ($n = 1$) annähernd übereinstimmt, während es andererseits die roten Strahlen bei $\lambda = 634$ ungefähr ebenso stark bricht wie der Diamant, der ja von allen farblosen Stoffen die höchsten Brechungsexponenten hat ($n = 2,4$ bis $2,5$).

Die beiden erwähnten Strahlengattungen werden nun aber vom Fuchsin nur so schwach absorbiert, daß man sie in der Theorie ohne weiteres als nicht absorbierte ansehen und auf sie also einfach die Fresnelschen Reflexionsformeln anwenden kann. Daraus folgt dann, daß, wenn das Licht auf das Fuchsin aus der Luft fällt, die genannten violetten Strahlen so gut wie gar nicht an ihm reflektiert werden, — denn für $n = 1$ wird ja nach der Formel 2 $R_0 = 0$ —; das erwähnte Rot dagegen wird nach diesen Darlegungen vom Fuchsin hierbei ungefähr ebenso stark reflektiert wie vom Diamanten, d. h. nach Formel 2 etwa 8mal so stark wie vom Wasser und etwa 4mal so stark wie vom gewöhnlichen Glase unter denselben Umständen. Man sieht demnach, daß in dem Falle, wo die Strahlen auf das Fuchsin aus der Luft fallen, die auf der roten Seite des Absorptionsmaximums dieses Farbstoffs liegenden schwach absorbierten Strahlen ganz erheblich viel stärker reflektiert werden als die auf der violetten Seite gelegenen. Das Umgekehrte wird jedoch eintreten, wenn das Licht auf die Fuchsinschicht aus Diamant fällt, denn dann wird nach der Formel 2a gerade für die roten Strahlen, für die ja jetzt $n_1 = n_2$ ist, $R_0 = 0$, während sich für die violetten, da für diese jetzt $n_1 = 2,4$ und $n_2 = 1$ wird, derselbe Wert ergibt, der sich oben für Rot ergab. Die Folge hiervon ist dann aber offenbar die, daß die Oberflächenfarbe des Fuchsins sich gegenüber der nach dem Haidingerschen Gesetze zu erwartenden Farbe beim Einfall des Lichtes aus der Luft stark nach der roten und beim Einfall aus dem Diamanten umgekehrt nach der violetten Seite des Spektrums hin verschieben muß; und dies ist nun auch tatsächlich der Fall, denn das Fuchsin zeigt an der Luft eine gelbgrüne, am Diamanten dagegen eine hellblaue Oberflächenfarbe, während sie nach dem Haidingerschen Gesetze in allen Fällen ein ziemlich reines Grün sein sollte.

Zur genaueren Verfolgung dieser Erscheinungen sind nun in der Tabelle VII die Brechungsexponenten und Absorptionskoeffizienten des Fuchsins für eine größere Reihe von Spektralstellen angegeben — und

Digitized by Google

zwar die Absorptionskoeffizienten nur für solche, die im Sinne der Cauchyschen Theorie als stark absorbierte Strahlen in Betracht kommen.

Tabelle VII.
Optische Konstanten des festen Fuchsins.

Fraunhofersche Linie	A	a	B	C	—	D	E	F	—	G	—	H
Wellenlänge	759	719	687	656	634	589	527	486	455	431	425	397
n	2,019	2,086	2,161	2,310	2,412	2,684	1,913	1,074	0,847	0,95	1,00	1,32
k	—	—	—	—	—	0,792	1,419	1,168	0,533	—	—	—

Die Werte von n sind außerdem auch in der ausgezogenen Kurve der Figur 2 graphisch dargestellt, während zugleich in der

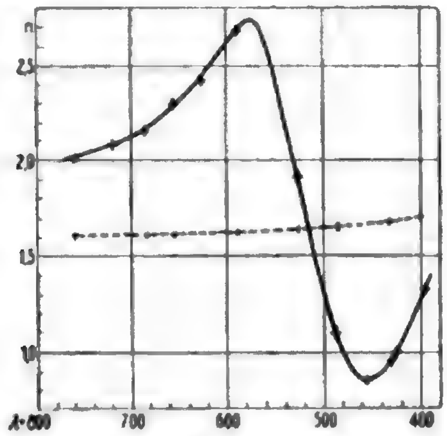


Fig 2.

punktierten Kurve daselbst die Brechungsexponenten des Schwefelkohlenstoffs wiedergegeben sind, um nämlich den gewaltigen Unterschied in dem Verhalten eines stark absorbierenden Farbstoffes und eines gewöhnlichen farblosen Körpers möglichst anschaulich vor die Augen zu führen.

Da sich nun die starke Absorption des Fuchsins nach den in der Tabelle angegebenen Werten von k etwa von 600 bis 440 $\mu\mu$ ausdehnt und sein Absorptionsmaximum etwa bei 540 $\mu\mu$ liegt, so sieht man aus der Figur 2, daß alle diejenigen Strahlen, welche vom Absorptionsmaximum aus nach der Seite der längeren Wellen hin liegen, einen relativ sehr hohen, die nach der anderen Seite zu gelegenen dagegen einen sehr niedrigen Wert der Brechungsexponenten besitzen, und es muß deswegen ein aus Fuchsin verfertigtes Prisma die roten Strahlen erheblich stärker ablenken als die violetten, während bekanntlich sämtliche farblosen Stoffe das umgekehrte Verhalten zeigen. Dies ist denn auch der Grund, warum man bei den stark absorbierenden Farbstoffen von einer **anomalen** Dispersion im Gegensatz zu der normalen der gewöhnlichen farblosen Stoffe spricht. Aehnlich wie das Fuchsin verhalten sich nämlich in dieser Beziehung auch die übrigen stark absorbierenden Farbstoffe, nur daß sich die Kurve der Brechungsexponenten natürlich je nach der Lage des Absorptionsmaximums im Spektrum entsprechend verschiebt.

Daß sich nun aber aus den in Tabelle VII angegebenen optischen Konstanten des Fuchsins auf Grund der Formeln 2 und 3 tatsächlich die Stärke des von diesem Farbstoff reflektierten Lichtes berechnen läßt, ergibt die Tabelle VIII, in welcher die so berechneten Zahlen direkt mit den durch Beobachtung gewonnenen zusammengestellt sind.

Tabelle VIII.
Berechnete und beobachtete Werte der von einem Fuchsinspiegel bei senkrechtem Auffall des Lichtes aus der Luft reflektierten Bruchteile R_0.

Fraunhofersche Linie λ		C 656	D 589	E 527	F 486	— 455	G 431
R_0	berechnet	0,168	0,244	0,271	0,242	0,083	0,001
	beobachtet	0,170	0,217	0,267	0,239	0,092	0,011

Fällt ferner das Licht nicht mehr senkrecht, sondern schräg auf einen Körper mit Oberflächenfarben, so hängt die Größe des reflektierten Bruchteiles auch hier — wie bei jeder Reflexion — außer von dem Brechungsexponenten und dem Absorptionskoeffizienten auch noch von der Größe des **Einfallswinkels** und von der Art der **Polarisation** des auffallenden Lichtes ab, da nämlich für Licht, welches parallel der Einfallsebene polarisiert ist — das übrigens im folgenden kurz p.p.-Licht genannt werden

Digitized by Google

soll —, sowohl bei stark wie bei schwach absorbierenden Medien ganz andere Reflexionsformeln gelten als für senkrecht zu jener Ebene polarisiertes (s.p.-Licht). Nennt man nämlich i den Einfallswinkel, r den zugehörigen Brechungswinkel, ferner R_i^p und R_i^s die beim Einfallswinkel i reflektierten Bruchteile für p.p.- und s.p.-Licht, so lauten die für jeden beliebigen Einfallswinkel gültigen Fresnelschen, d. h. sich auf schwach absorbierte Strahlen beziehenden Reflexionsformeln

$$R_i^p = \frac{\sin^2(i-r)}{\sin^2(i+r)} \quad \text{(für p.p.-Licht)} \qquad 4)$$

und

$$R_i^s = \frac{tg^2(i-r)}{tg^2(i+r)} \quad \text{(für s.p.-Licht)} \qquad 5)$$

und die ebenso allgemein geltenden Cauchyschen Reflexionsformeln für stark absorbierte Strahlen:

$$R_i^p = \frac{\sin^2(i-r) + k_i^2\sin^2 r}{\sin^2(i+r) + k_i^2\sin^2 r} \qquad 6)$$

(für p.p.-Licht)

und

$$R_i^s = \frac{\cos^2(i+r)tg^2 i + k_i^2\sin^2 r}{\cos^2(i-r)tg^2 i + k_i^2\sin^2 r} R_i^p \qquad 7)$$

(für s.p.-Licht).

Ueber die Bedeutung von k_i siehe weiter unten.

Ist ferner das auffallende Licht unpolarisiert, so kann man es zur einen Hälfte als p.p.- und zur anderen als s.p.-Licht ansehen und hat dann also in beiden obigen Fällen für die Größe R_i des reflektierten Bruchteiles die Gleichung:

$$R_i = \frac{1}{2}(R_i^p + R_i^s) \qquad 8)$$

Der Brechungswinkel r ergibt sich dabei für schwach absorbierte Strahlen bekanntlich aus dem Snelliusschen Brechungsgesetz:

$$\sin i = n \sin r, \qquad 9)$$

wo n allgemein das Verhältnis der Brechungsexponenten der beiden aneinander stoßenden, in diesem Falle als schwach absorbierend anzusehenden Medien darstellt.

Für stark absorbierte Strahlen dagegen gilt die Gleichung 9 nicht mehr, sondern es treten vielmehr an ihre Stelle die drei sogenannten Kettelerschen Gleichungen:

$$\sin i = n_i \sin r \qquad 10)$$

$$n_i^2 - k_i^2 = n^2 - k^2 \qquad 11)$$

$$n_i k_i \cos r = n k, \qquad 12)$$

aus denen hervorgeht, daß hier Brechungsexponent und Absorptionskoeffizient nicht mehr wie bei den farblosen Medien konstant sind, sondern daß jeder Einfallswinkel i seine besonderen Werte n_i und k_i besitzt. Die Werte n und k ferner, die in diesen Gleichungen auftreten und auch schon in den Gleichungen 3 und 3a vorkamen, gelten also hier nur für senkrechten Einfall und sind daher genauer mit n_0 und k_0 zu bezeichnen.[1])

Was nun aber weiter die Veränderungen anbetrifft, welche die drei Größen R_i^p, R_i^s und R_i mit wachsendem Einfallswinkel erleiden, so ist zunächst zu bemerken, daß R_i^p in allen Fällen, d. h. also sowohl bei schwach wie bei stark absorbierten Strahlen, mit dem Einfallswinkel zunimmt, um für $i = 90^0$, d. h. für streifenden Einfall, $= 1$ zu werden. Wie stark demnach auch die Oberflächenfarbe eines Stoffes bei senkrechtem Auffall ist: läßt man p.p.-Licht schräg auf ihn fallen, oder betrachtet man ihn — was auf dasselbe hinauskommt — schräg durch einen Polarisationsapparat, der nur p.p.-Licht durchläßt, so wird mit wachsendem Einfallswinkel seine Oberflächenfarbe immer blasser, um für $i = 90^0$ vollständig zu verschwinden. Denn da für $i = 90^0$ die reflektierte Intensität für alle Strahlen des Spektrums gleich 1 wird, d. h. also auch alle gleich stark reflektiert werden, so kann hier von einer Oberflächenfarbe natürlich nicht mehr die Rede sein.

Ganz anders liegen dagegen die Verhältnisse bei s.p.-Licht. Zunächst nämlich folgt schon aus der in diesem Falle für schwach absorbierte Strahlen gültigen Gleichung 5, daß für $i + r = 90^0$ der Nenner der rechten Seite unendlich groß und mithin $R_i^s = 0$ wird oder mit anderen Worten, daß in diesem Falle von dem s.p.-Licht überhaupt nichts reflektiert wird. Den zugehörigen Einfallswinkel, der bekanntlich der Polarisationswinkel des Stoffes für die betreffende Wellenlänge heißt, findet man in diesem Falle sehr leicht mit Hilfe der Gleichung 9; denn daraus ergibt sich für ihn, wenn wir ihn mit h bezeichnen, die bekannte Brewstersche Gleichung:

$$tg\, h = n. \qquad 13)$$

Es hängt demnach bei schwach absorbierten Strahlen die Größe des Polarisationswinkels nur von der Größe des Brechungsexponenten des Stoffes für den betreffenden Strahl ab; und da nun bekanntlich auch alle farblosen Stoffe für die verschiedenen Strahlen des Spektrums einen verschiedenen Brechungsexponenten haben, so haben also alle diese Strahlen auch ihren besonderen Polarisationswinkel, d. h. für jeden dieser Strahlen ist hier derjenige Einfallswinkel, bei welchem s.p.-Licht überhaupt nicht reflektiert wird, ein anderer.

[1]) Näheres über die Ableitung aller dieser Formeln s. in den Artikeln „Lichtpolarisation“ und „Lichtreflexion“.

Digitized by Google

Für einen bestimmten dieser verschiedenen Einfallswinkel wird mithin die zugehörige Farbe des Spektrums überhaupt nicht, die anderen Farben dagegen mehr oder weniger stark reflektiert, und somit muß das gesamte reflektierte Licht aus diesem Grunde gefärbt erscheinen. Diese von der Verschiedenheit der Polarisationswinkel der verschiedenen Farben herrührende Oberflächenfärbung tritt nun hiernach allerdings in erster Linie bei s.p.-Licht auf, da jedoch auch das unpolarisierte Licht zur Hälfte aus s.p.-Licht besteht, so wird sie sich, wie wir später sehen werden, unter Umständen auch bei diesem bemerkbar machen. Bei den gewöhnlichen farblosen Stoffen freilich sind die Unterschiede der Brechungsexponenten für die einzelnen Farben so gering, daß hier auch die Polarisationswinkel nahezu für alle Farben denselben Wert haben und deswegen die von dieser Ursache herrührende Färbung sogar beim reflektierten s.p.-Licht im allgemeinen nur wenig zur Geltung kommt. Bei den Körpern mit Oberflächenfarben dagegen unterscheiden sich, wie wir oben gesehen haben, auch schon bei den schwach absorbierten Strahlen die Brechungsexponenten für die verschiedenen Strahlen des Spektrums ganz beträchtlich, und diese Unterschiede sind es nun auch in erster Linie, welche die ziemlich starke Veränderlichkeit der Oberflächenfarbe dieser Stoffe mit dem Einfallswinkel bedingen. Für das Fuchsin z. B. folgt aus der Gleichung 13 auf Grund der in der Tabelle VII angegebenen Werte von n, daß beim Einfall des Lichtes aus Luft die Polarisationswinkel dieser Substanz für das letzte Blau und das Violett sämtlich zwischen 30 und 50°, diejenigen für das ganze Rot dagegen zwischen 60 und 70° liegen; und es wird demnach für die ersteren Einfallswinkel das blaue und violette, und für die letzteren das rote s.p.-Licht so gut wie gar nicht reflektiert. Das erstere hat nun allerdings, da ja jene Farben an der Grenzschicht Luft/Fuchsin sowieso nur schwach reflektiert werden, auf den Ton der s.p.-Oberflächenfarbe nur wenig Einfluß, um so mehr aber das letztere, da ja das Rot wegen seiner hohen Brechungsexponenten hier mit zu den stark reflektierten Strahlen gehört. Tatsächlich ändert denn auch das Fuchsin seine gelbgrüne Luft-Oberflächenfarbe bei Anwendung von s.p.-Licht bis zu etwa 50° Einfallswinkel hin nur wenig, von da ab aber mit weiter wachsendem Einfallswinkel sehr beträchtlich, da sie zuerst grün, dann blaugrün und bei etwa 70° rein blau wird, um bei noch größeren Einfallswinkeln schnell in ein helles Violett und schließlich von 85° an in vollständiges Weiß überzugehen.

Der Umstand, daß der Ton der Farbe bei 70° rein blau ist, deutet darauf hin, daß hier in dem reflektierten s.p.-Lichte außer dem Rot vor allem auch noch das zum Blau komplementäre Gelb fehlen muß, und dies hat nun seinen Grund darin, daß bei diesen Einfallswinkeln die gelben Strahlen, trotzdem sie zu den vom Fuchsin stark absorbierten gehören, da ihr Absorptionskoeffizient noch verhältnismäßig niedrig, ihr Brechungsexponent dagegen — ähnlich wie der der benachbarten roten Strahlen — ganz außerordentlich hoch ist, sich auch bei der Reflexion noch ähnlich wie diese verhalten, d. h. im s.p.-Lichte nur sehr schwach reflektiert werden. Im übrigen haben aber auch stark absorbierte Strahlen ähnlich wie die schwach absorbierten ihren besonderen Einfallsfall, den sogenannten Haupteinfallswinkel nämlich, welcher dem Polarisationswinkel der ersteren analog ist, für den aber allerdings das einfallende s.p.-Licht bei der Reflexion nicht völlig verschwindet, sondern nur ein Minimum wird. Dieser Haupteinfallswinkel h berechnet sich für solche Strahlen aus der Gleichung

$$tg^2 h = n_h^2 + k_h^2 \qquad 14)$$

in der n_h und k_h die zum Winkel h zugehörigen Werte von n und k bedeuten, und die offenbar eine Verallgemeinerung der Brewsterschen Gleichung 13 darstellt.

Zum Beweis der obigen Darlegungen sind nun in der Tabelle IX die auf Grund der Formeln 4 bis 8 berechneten Werte von R_i^p, R_i^s und R_i für die meisten der früher berücksichtigten Farben des Spektrums für einen Einfallswinkel von i = 70°31′ wiedergegeben. Dieser letztere Winkel ist nämlich der Haupteinfallswinkel des Fuchsins für das gelbe Licht der D-Linie. Außerdem sind in Tabelle IX auch die Werte von R_0 aus Tabelle VIII wiederholt.

(Tabelle IX siehe nächste Seite.)

Die Tabelle zeigt nun tatsächlich, daß für den in Betracht gezogenen Einfallswinkel die Werte von R_i^s nicht bloß für das schwach absorbierte Rot, sondern auch für das stark absorbierte Gelb und Grün bis zur E-Linie nur sehr klein sind, und daß sie lediglich für die blauen Strahlen zwischen F und G beträchtlichere Größen erreichen. Die bei etwa 70° Einfallswinkel zu beobachtende rein blaue s.p.-Oberflächenfarbe des Fuchsins findet mithin durch die als Grundlage aller unserer Darlegungen angenommenen Reflexionsformeln 4 bis 8 ihre volle Erklärung, und in ähnlicher Weise erklären sich auch die sonstigen sich bei diesem und anderen Stoffen dieser Art noch zeigenden, vielfach so reizvollen Veränderungen ihrer Oberflächenfarbe. Es sei deshalb hier nur noch erwähnt, daß zu dieser Art von Stoffen

Digitized by Google

Tabelle IX.
Reflektierte Bruchteile an der Grenzschicht Luft/Fuchsin für i = 70°31'.

Fraunhofersche Linie Wellenlänge	C 656	D 589	E 527	F 486	— 455	G 431	H 397
R_i^p	0,528	0,621	0,652	0,650	0,523	0,231	0,220
R_i^s	0,007	0,016	0,092	0,222	0,254	0,193	0,052
R_i	0,268	0,318	0,372	0,436	0,389	0,212	0,136
R_o	0,168	0,244	0,271	0,242	0,083	0,001	0,019

außer den stark absorbierenden Stoffen zunächst auch ihre konzentrierten Lösungen und ferner gewisse Kristalle, wie z. B. das Magnesiumplatincyanür, gehören, von denen hier noch kurz die Rede sein soll.

Was nämlich zunächst die konzentrierten Lösungen eines stark absorbierenden Farbstoffes angeht, so gehen die optischen Eigenschaften des letzteren natürlich — wenn auch in mehr oder weniger abgeschwächter Form — in die Lösung über, und auch diese besitzt demnach ihre stark und ihre schwach absorbierten Strahlen sowie die dadurch bedingte anomale Dispersion, d. h. es sind auch bei ihr die Brechungsexponenten für die auf der roten Seite des Absorptionsmaximums gelegenen Strahlen erheblich größer als die der anderen Seite. Als Beispiel sind in Tabelle X die Brechungsexponenten einer 18,8 prozentigen Fuchsinlösung in Alkohol angegeben.

Tabelle X.
Brechungsexponenten einer 18,8 prozentigen Fuchsinlösung in Aethylalkohol.

Fraunhofersche Linie	B	C	D	F	G	H
Brechungsexponent	1,450	1,502	1,561	1,312	1,285	1,312

Der Verlauf der Brechungsexponenten ist hier also ein ganz ähnlicher wie bei dem festen Fuchsin, nur daß die Unterschiede der Werte erheblich geringer sind. Die Folge davon ist, daß die Oberflächenfarbe, welche diese Lösung an der Luft zeigt, nur schwach ausgesprochen ist. Wesentlich anders liegen jedoch die Verhältnisse, wenn das Licht z. B. aus Glas auf die Lösung fällt; denn, da dann im Rot die Brechungsexponenten der beiden aneinanderstoßenden Medien annähernd übereinstimmen, im Blau und Violett dagegen ziemlich stark voneinander abweichen, so folgt aus der Formel 2a, daß in diesem Falle auch schon bei senkrechtem Einfall des Lichtes das blaue Ende des Spektrums in der Reflexionsfarbe ganz erheblich vor dem roten Ende vorherrschen, d. h., daß die Reflexionsfarbe einer konzentrierten Fuchsinlösung am Glase **rein blau** sein muß, und dies ist nun auch tatsächlich der Fall. Noch schönere Färbungen dieser Art zeigen die konzentrierten Lösungen des Fluoreszeins in Kali- oder Natronlauge, da man nämlich in diesem Falle Konzentrationen mit über 50 % Farbstoff herstellen kann. Die Oberflächenfarben derartiger Lösungen treten übrigens schon an den Glasflaschen, in welchen man die Lösungen aufbewahrt, mit großer Stärke hervor, denn auch hier erfolgt ja der Einfall des Lichtes auf die Lösung aus dem dieselbe umgebenden Glase heraus. Das letztere darf aber natürlich, wenn man die Oberflächenfarbe rein beobachten will, nicht gefärbt sein, und außerdem ist es zweckmäßig, hierbei die Flasche in ein größeres, mit Wasser oder noch besser Benzol gefülltes Gefäß zu tauchen, um das an der Außenseite der Flasche reflektierte Licht, das die Beobachtung des innen reflektierten stört, zu beseitigen. Am vollkommensten geschieht dies nach Formel 2a, wenn die Brechungsexponenten des umgebenden Stoffes mit dem des Glases übereinstimmen, was beim Benzol annähernd der Fall ist.

Beim schrägen Einfall des Lichtes verschiebt sich auch hier wieder der Ton der Reflexionsfarbe nach der blauen Seite des Spektrums hin — und zwar besonders für s.p-Licht, im schwächeren Grade aber auch für gewöhnliches, das ja zur Hälfte aus ersterem besteht.

Ein in vieler Beziehung ähnliches Verhalten wie diese Oberflächen der stark absorbierenden Farbstofflösungen am Glase zeigen nun auch die bekannten **Schillerfarben vieler Tiere**, die ja besonders unter den Schmetterlingen, Käfern und Vögeln verbreitet sind: und es ist deshalb zuerst von B. Walter die Vermutung ausgesprochen worden, daß die Ursache dieser Farben in stark absorbierenden Farbstoffen zu suchen

Digitized by Google

sei, die in der Chitin- bezw. Hornsubstanz dieser Geschöpfe gelöst sind. Auch andere Physiker, wie Garbasso und Michelson, sind dieser Ansicht beigetreten, während mehrere Zoologen, wie Biedermann und Mallock, die Auffassung vertreten, daß es sich hier um Farben dünner Blättchen handelt. Die früher in dieser Hinsicht vielfach ausgesprochene Vermutung dagegen, daß diese Farbe als eine Gitterfarbe anzusehen sei, d. h. durch Beugung des Lichtes an sehr feinen, in die Oberfläche dieser Tiere eingelagerten Streifen verursacht werde, läßt sich schon deswegen nicht aufrecht erhalten, weil bei vielen derselben solche Streifen überhaupt nicht vorhanden sind — ganz abgesehen davon, daß auch die physikalischen Veränderungen einer Gitterfarbe mit dem Einfallswinkel usw. ganz andere sind als die bei den in Rede stehenden eigentlichen Schillerfarben der Tiere. Damit ist natürlich nicht gesagt, daß nicht auch im Tierreich vielfach Farben auftreten, die auf eine Gitterwirkung zurückzuführen sind — hierzu dürften in erster Linie diejenigen zu rechnen sein, die man gewöhnlich als „irisierende" bezeichnet, und die dadurch charakterisiert sind, daß sie ihren Farbenton schon bei geringer Aenderung des Gesichtswinkels ganz erheblich ändern —, dann aber sind es eben Erscheinungen ganz anderer Art als diejenigen, welche hier allein als „Schillerfarben" bezeichnet werden.

Auch die „Farben trüber Medien", die man vielfach zur Erklärung dieser eigentlichen Schillerfarben des Tierreiches herangezogen hat, können hier schon deswegen nicht in Frage kommen, weil es sich bei ihnen nicht um eine durch regelmäßige Reflexion, sondern nur um eine durch allseitige Zerstreuung des einfallenden Lichtes erzeugte Farbe handelt, die daher auch niemals den Glanz erreichen kann, wie er den wirklichen Schillerfarben eigentümlich ist. Dasselbe würde übrigens eventuell auch für Farben gelten, die durch „optische Resonanz", d. h. durch Zerstreuung bestimmter Wellen des einfallenden Lichtes infolge Mitschwingens an gewissen kleinsten Teilchen, die in der Oberhaut der betreffenden Organe der Tiere liegen, zustandekommen sollen — ganz abgesehen davon, daß eine derartige Entstehung einer Farbe überhaupt noch zweifelhaft ist, und daß es sich dabei vielmehr wahrscheinlich nur um eine besondere Art der Farben trüber Medien handelt. Näheres darüber siehe unter 5 und 6.

Die einzige außer den eigentlichen Oberflächenfarben hier noch in Frage kommende Farbenart scheint daher nur noch die der Farben dünner Blättchen zu sein, indessen spricht auch gegen diese vor allen Dingen die verhältnismäßig geringe Veränderlichkeit der Schillerfarben mit dem Einfallswinkel, sowie auch z. B. der Umstand, daß unter diesen Farben niemals eine solche mit einem rosa Farbenton beobachtet wird, während gerade dieser bei den Farben dünner Blättchen der bevorzugte ist.

Gegen die Auffassung als Oberflächenfarben und für die der Farben dünner Blättchen spricht andererseits der Umstand, daß die Schillerfarben sich durch Druck verändern lassen und besonders auch der, daß die Farben verschwinden, wenn man die betreffenden Organe in ein Medium bringt, dessen Brechungsexponent annähernd mit dem des Chitins bezw. des Harnstoffes übereinstimmt; denn hierbei geben die Lösungen der stark absorbierenden Farbstoffe, wie wir oben gesehen haben, meist noch schönere Farben als an der Luft, während die Interferenzfarbe eines dünnen, aus Luft bestehenden Blättchens natürlich verschwinden muß, wenn der Luftraum mit einem Medium ausgefüllt wird, das den gleichen Brechungsexponenten hat, wie der den Raum umgebende Stoff. Näheres darüber siehe unter 4.

Können demnach die Schillerfarben des Tierreichs hinsichtlich ihres Ursprungs noch als zweifelhaft gelten, so ist dies nicht der Fall bei denjenigen gewisser Kristalle, wie z. B. des Magnesiumplatincyanürs, da diese zweifellos als Oberflächenfarben nachzuweisen sind. Das Eigenartige aber, was diese Körper vor den früher betrachteten einfachen Körpern mit Oberflächenfarben auszeichnet, besteht darin, daß wir es hier meist mit doppelt brechenden Körpern zu tun haben, die also das einfallende Licht in zwei Teile, einen ordentlich und einen unordentlich gebrochenen, zerlegen: und daß dann meistens nur der eine dieser beiden Teile in dem Kristall stark absorbiert wird, so daß also auch nur dieser eine Oberflächenfarbe zeigen kann. Beim Magnesiumplatincyanür z. B. ist es nur der unordentlich gebrochene Strahl, was sich hier u. a. darin äußert, daß bei senkrechter Beleuchtung die beiden Grundflächen des Kristalls keine Oberflächenfarbe zeigen, sondern nur die vier Seitenflächen. Die ersteren zeigen vielmehr eine solche Farbe erst bei schrägem Auffall des Lichtes, da ja erst dann an ihr neben den ordentlichen auch ein unordentlicher Strahl entsteht; um aber in diesem Falle die Reflexionsfarbe des letzteren gut zu beobachten, muß man durch Anwendung eines Polarisationsapparates, also am einfachsten eines Nikolschen Prismas, das keine solche Färbung zeigende ordentliche Licht beseitigen, eine Maßregel,

Digitized by Google

die natürlich auch bei der Beobachtung der Oberflächenfarbe der Seitenflächen von Nutzen ist.

4. Die Farben dünner Blättchen.[1]) Diese Farben entstehen, wenn weißes Licht sowohl an der Vorder- wie an der Hinterseite einer sehr dünnen, parallelwandigen und farblosen Schicht reflektiert wird. Die beiden auf diese Weise in gleicher Richtung ins Auge gelangenden, von derselben ursprünglichen Schwingung herrührenden Teilschwingungen besitzen nämlich wegen des verschiedenen Weges, den sie zurückgelegt haben, einen bestimmten Phasenunterschied, welcher im wesentlichen von dem Verhältnis der Lichtwellenlänge in der dünnen Schicht zu der Dicke der letzteren abhängt und daher für die verschiedenen Farben des Spektrums verschieden ausfällt. Von diesen werden sich dann diejenigen, bei welchen jener Phasenunterschied eine ungerade Anzahl von halben Wellenlängen beträgt, durch Interferenz auslöschen, während diejenigen, für welche jene Differenz eine gerade Anzahl von Wellenlängen ausmacht, in ihrer vollen Stärke zur Wirkung kommen. Am reinsten wird die Farbe dann, wenn die Schicht eine solche Dicke hat, daß durch diese Interferenz ein ganzer Farbenbezirk des Spektrums, also z. B. das ganze Grün nahezu vollständig vernichtet wird, und zugleich der dazu komplementäre Bezirk, also in diesem Falle das Rot, in voller Stärke auftritt. Dies ist nun nicht für die allerdünnsten Schichten der Fall, welche eine solche Interferenzfarbe zeigen, sondern erst für gewisse mittlere Dicken. Handelt es sich z. B. um ein dünnes Blättchen aus Luft, wie wir es u. a. beim Newtonschen Ringsystem vor uns haben, so beginnen die Farben schon bei einer Schichtdicke von etwa 100 $\mu\mu$, ihren reinsten Ton erlangen sie aber erst etwa bei der 6- bis 8fachen Dicke. Nach Tabelle I ist nämlich $^{\lambda}/_{2}$ für das mittlere Rot = 330 und für das mittlere Grün = 270 $\mu\mu$, so daß also $4 \cdot {}^{\lambda}/_{2}$ des ersteren = 1320 und $5^{\lambda}/_{2}$ des letzteren = 1350 $\mu\mu$ ist. Ferner ergibt sich $5\,^{\lambda}/_{2}$ des ersteren = 1650 $\mu\mu$ und $6\,^{\lambda}/_{2}$ des letzteren = 1620 $\mu\mu$, sodaß also für diese Wegdifferenzen, d. h. also für Schichtdicken von 600 bis 800 $\mu\mu$ das Rot und das Grün sich bei der Interferenz tatsächlich entgegengesetzt verhalten müssen.

Eine weitere bemerkenswerte Eigenschaft der Farben dünner Blättchen ist die, daß diese Farben stets — solange wenigstens nicht eine Färbung des Lichtes durch andere Ursachen, wie durch Absorption oder reine Reflexion, in Frage kommt — stets dieselben Farbentöne zeigen müssen, so daß also z. B. das Newtonsche Ringsystem, in dem ja alle möglichen Schichtdicken vertreten sind, zugleich auch alle überhaupt möglichen Farben dünner Blättchen zeigt. Wenn nämlich auch die Interferenzfarbe eines farblosen dünnen Blättchens einesteils von seiner Dicke, und ferner zweitens auch von seinem Brechungsexponenten abhängt — denn ein höherer Brechungsexponent bedingt ja eine entsprechende kleinere Wellenlänge in dem betreffenden Medium —, ja, wenn hierbei auch noch, wie wir später sehen werden, der Einfallswinkel des Lichtes in Frage kommt, so können doch alle diese Veränderungen, da sie ja alle Farben des Spektrums in gleicher Weise betreffen, immer nur eine Verschiebung der Farbe in der Reihe der Newtonschen Ringfarben, nicht aber einen neuen Farbenton erzeugen; und nur insofern können hierbei kleine Veränderungen auftreten, als die verschiedene Dispersionsfähigkeit der verschiedenen Stoffe für die verschiedenen Farben des Spektrums eine geringfügige Aenderung in dem Verhältnis ihrer Wellenlängen in jenen Stoffen bedingt.

Was sodann die Art der Veränderlichkeit der Farben dünner Blättchen mit dem Einfallswinkel betrifft, so wandern diese Farben mit wachsendem Winkel nicht, wie man auf den ersten Augenblick glauben möchte und auch vielfach angegeben findet, nach der Seite der längeren, sondern nach der der kürzeren Wellen. Jene falsche Ansicht rührt nämlich daher, daß man meint, daß bei schrägem Durchgang des Lichtes durch das Blättchen die Wegdifferenz in ihm größer wird, und daher hierbei gewissermaßen längere Wellen an Stelle der kürzeren treten. Dabei ist aber übersehen, daß bei schrägem Auffall des Lichtes außer der Wegdifferenz im Innern des Blättchens auch eine solche außerhalb desselben in Frage kommt, die bei senkrechtem Auffall nicht vorhanden und die jene innere Vergrößerung der Differenz mehr als aufhebt. In den beiden Figuren 3 und 4 ist diese äußere Wegdifferenz durch die Strecke DC dargestellt.

Daß hier zwei verschiedene Figuren gezeichnet sind, hat seinen Grund darin, daß in der Natur zwei wesentlich voneinander verschiedene Arten dünner Blättchen vorkommen, einmal nämlich solche, bei denen dasselbe aus einer zwischen zwei festen Stoffen befindlichen dünnen Luftschicht besteht, wie dies z. B. beim Newtonschen Ringsystem der Fall ist, und ferner solche, bei denen es sich um ein wirkliches Blättchen aus einer festen oder

[1]) Siehe hierüber auch den Artikel „Lichtinterferenz“.

flüssigen Substanz handelt (Glimmerblättchen, Seifenblasen usw.).

Diese beiden Fälle sind nun in den Figuren 3 und 4 dargestellt, und man sieht zunächst aus 3, daß die Phasendifferenz δ zwischen den beiden interferierenden Strahlen I und II hier $= \frac{A'B + BC' - DC}{\lambda}$ ist, wo λ die Wellenlänge der Strahlen in Luft darstellt.

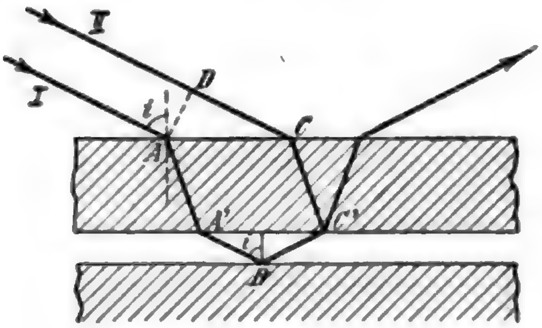


Fig. 3

Eine einfache Umformung des Ausdrucks liefert die Gleichung

$$\delta = \frac{2d \cos i}{\lambda} \qquad 15)$$

wo i den Einfallswinkel und d die Dicke der dünnen Schicht bedeutet. Diese Gleichung zeigt, daß für i = 90°, also für streifenden Eintritt des Lichtes, $\delta = 0$ wird, d. h. daß in diesem Falle die Schicht sich, wie groß auch d sei, wie eine unendlich dünne verhält. Die Bestätigung dieser Folgerung ergibt sich ohne weiteres am Newtonschen Ringsystem; denn je schräger man auf dasselbe blickt, um so weiter dehnt sich der innere schwarze Fleck, der der Phasendifferenz 0 entspricht, nach außen hin aus.

Die Gleichung 15 gilt aber auch für den Fall der Figur 4, nur daß dann λ die Größe der Wellenlänge in der Substanz

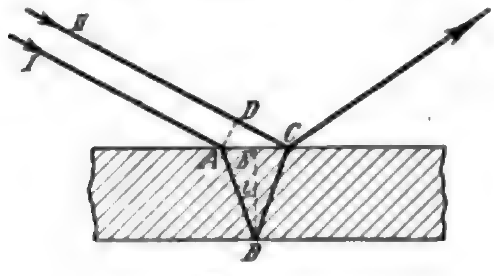


Fig. 4.

des Blättchens bedeutet. Um sie abzuleiten, hat man davon auszugehen, daß hier die Phasendifferenz δ der beiden Strahlen I und II $= \frac{AB + BC}{\lambda_i} - \frac{DC}{\lambda_a}$ ist, wo λ_i die Wellenlänge im Blättchen und λ_a die in der äußeren Umgebung desselben bedeutet.

Bemerkenswert ist hier ferner noch, daß die Farbe der dünnen Schicht sich im Falle der Figur 3 viel stärker mit dem Einfallswinkel ändert als in dem der Figur 4. Es liegt dies daran, daß bei Figur 3 der Winkel, welchen der Strahl in der Schicht selbst mit der Normalen ihrer Grenzflächen bildet, gleich dem Einfallswinkel draußen ist, und also sich mit diesem zugleich zwischen 0 und 90° ändert; in Figur 4 dagegen ist der innere Einfallswinkel stets erheblich kleiner als der äußere, so daß der erstere z. B. bei einem Blättchen, dessen Brechungsexponent = 1,6 ist, im höchsten Falle nur etwa 40° wird.

Die Frage, ob es sich in einem bestimmten Falle um eine dünne Luftschicht oder um ein wirkliches dünnes Blättchen aus einer festen Substanz handelt, läßt sich in den meisten Fällen dadurch entscheiden, daß man das Blättchen in eine Flüssigkeit bringt, da nämlich im ersteren Falle die dünne Schicht sich mit der Flüssigkeit vollsaugen wird und dann ihr Farbenton sich um ein Beträchtliches ändern muß, im anderen Falle dagegen nicht. Die Aenderung des Farbentones im ersteren Falle rührt natürlich daher, daß die Wellenlängen in der Flüssigkeit kleiner sind als in der Luft, so daß das Blättchen sich dann wie ein solches von größerer Dicke verhalten, d. h. der Ton der Interferenzfarbe sich nach der Seite der längeren Wellen hin verschieben muß. Diese Verschiebung ist um so beträchtlicher, je dicker die Luftschicht ist, aber auch schon bei den innersten Farben des Newtonschen Ringsystems ist sie ziemlich bedeutend, da sie z. B. für das Blau der zweiten Ordnung, der ersten wirklich ausgesprochenen Farbe dieses Systems, der eine Schichtdicke von 360 $\mu\mu$ entspricht — vgl. den Artikel „Lichtinterferenz" — schon bei Immersion in Aether (n = 1,36) vom Blau zum Rot springen muß, denn es ist 360 × 1,36 = 490 und der Dicke 490 $\mu\mu$ entspricht schon das Rot der zweiten Ordnung.

Da nun aber auch die wirklichen Schillerfarben des Tierreichs — s. oben unter 3 — beim Eintauchen der betreffenden Organe in eine solche Flüssigkeit eine deutliche Aenderung ihres Farbentones zeigen, so würde, wenn es sich hier um Farben dünner Blättchen handelte, zunächst aus der Tatsache dieser Veränderlichkeit hervorgehen, daß hierbei in allen diesen Fällen dünne Luftschichten in Frage kommen müssen. Nach den obigen Darlegungen würde ferner einesteils die Farbe dieser dünnen Luftschichten mit wachsendem Einfallswinkel nacheinander alle Farben des Newtonschen

Digitized by Google

Ringsystems durchlaufen müssen, was bei den Schillerfarben des Tierreichs keineswegs der Fall ist, und andererseits würde ihr Farbenton z. B. beim Eintauchen in Aether selbst schon dann, wenn es sich dabei um das Blau der ersten Ordnung handelt, vom Blau zum Rot springen müssen, während in Wirklichkeit dabei nur eine Verschiebung vom Blau bis zum benachbarten Grün zu beobachten ist.

Ein weiteres Unterscheidungsmittel der Farben dünner Blättchen von den Oberflächenfarben besteht darin, daß die ersteren mit der Polarisationsart des angewandten Lichtes nur ihre Stärke, nicht aber ihren Farbenton ändern, während die letzteren, wie unter 3 näher dargelegt wurde, für schrägen Auffall bei Anwendung von s.p.-Licht nicht bloß eine gesättigtere, sondern auch eine andere Farbe aufweisen als bei p.p.-Licht.

5. Die Farben trüber Medien. Diese meist nur schwach ausgesprochenen Farben entstehen, wenn in einem im übrigen gut durchsichtigen, festen, flüssigen oder gasförmigen Medium sehr viele und sehr feine undurchsichtige Teilchen zerstreut sind. Die letzteren werden nämlich durch die Wirkung des einfallenden Lichtes zu Ausgangspunkten besonderer Wellen, und bewirken also dadurch eine Zerstreuung des ersteren. Das bekannteste hierher gehörige Beispiel ist die atmosphärische Luft, an deren Staubteilchen das Licht der Sonne zerstreut wird und so das Blau des Himmels bildet. Nach J. W. Strutt (Lord Rayleigh), der zuerst diese Theorie der Farben trüber Medien aufgestellt hat, wächst nämlich die Intensität des zerstreuten Lichtes umgekehrt proportional der vierten Potenz der Wellenlänge des Lichtes, so daß deswegen das Blau erheblich stärker zerstreut wird als das Rot (s. auch den Artikel „Atmosphärische Optik"). In dem durchgehenden Licht wird dagegen umgekehrt das blaue Ende des Spektrums stärker geschwächt erscheinen als das rote, wie ja auch die Sonne selbst, wenn sie am Horizonte steht, stets rötlich aussieht. Auch an dem Blau des Himmels selbst macht sich diese größere Absorption der kürzeren Wellen insofern bemerkbar, als die dem Horizonte näher gelegenen Teile des blauen Himmels stets mehr grün gefärbt sind als die beim Zenith befindlichen — und zwar besonders diejenigen Teile, welche der am Horizont stehenden Sonne gegenüber liegen, da nämlich hier auch schon das das Himmelsblau erzeugende Licht einen langen Weg durch die Atmosphäre gemacht hat.

Andere Beispiele der Farben trüber Medien sind die sogenannten kolloidalen Lösungen, bei denen feste Teilchen, deren Größe erheblich kleiner ist als die Wellenlänge des Lichtes, in einem durchsichtigen und farblosen festen oder flüssigen Medium schweben. Eine solche Lösung erhält man z. B., wenn man von einer alkoholischen Harzlösung nach und nach einige Tropfen zu einer größeren Menge Wassers zusetzt, oder wenn man mit Hilfe eines elektrischen Lichtbogens oder eines Wehneltunterbrechers ein Metall in Wasser zerstäubt. Werden die Teilchen größer, so wird die Farbe des zerstreuten Lichtes bei gewöhnlichen Teilchen weißlicher, da dann eben außer der Rayleighschen Zerstreuung auch noch gewöhnliche Reflexion hinzukommt; handelt es sich dabei um Metallteilchen, so tritt im zerstreuten Lichte zugleich auch ihre Reflexionsfarbe und im durchgelassenen ihre Absorptionsfarbe mit auf.

Schließlich sei noch erwähnt, daß das nach der Rayleighschen Theorie zerstreute Licht auch eine Polarisation zeigt, die ihren größten Wert hat, wenn der zerstreute und der einfallende Strahl aufeinander senkrecht stehen. Auch das Blau des Himmels zeigt sich stets mehr oder weniger polarisiert, jedoch liegen hier die Verhältnisse ziemlich verwickelt, weil außer dem direkten Sonnenlicht auch das des übrigen Himmels mitwirkt.

6. Resonanzfarben. Die Vermutung, daß auch bei den optischen, ebenso wie bei den elektromagnetischen Schwingungen eine Absorption durch Resonanz der absorbierenden Teilchen mit den einfallenden Wellen zustandekommen kann, wurde 1902 zuerst von Wood ausgesprochen. Dieser hatte bei der Destillation von Alkalimetallen in luftleeren Gefäßen an den kälteren Teilen derselben feine metallische Niederschläge erhalten, die sowohl im durchgelassenen wie im zerstreuten Lichte lebhafte Farben zeigten, und zwar war die Farbe des letzteren stets komplementär zu der des ersteren. Die Untersuchung mit dem Mikroskop zeigte, daß es sich hier um kleine Teilchen von 200 bis 300 $\mu\mu$ handelte, und wenn diese Teilchen weit voneinander lagen, so zeigte sich nur diffus zerstreutes Licht und keine regelmäßige Reflexion; bei dichterer Lagerung der Teilchen dagegen hauptsächlich regelmäßig reflektiertes Licht und zugleich eine viel tiefere Färbung des durchgelassenen.

Später stellte Wood solche Metallniederschläge auch durch kathodische Zerstäubung von Gold sowie auch auf chemischem Wege her, jedoch waren die Teilchen in diesem Falle so klein, daß ihre Größe mit dem Mikroskop nicht mehr gemessen werden konnte.

Aehnliche Beobachtungen wurden kurze Zeit darauf auch von Kossonogoff veröffentlicht, der solche Schichten auch durch

Zerstäubung verdünnter Salz-, Farbstoff- und kolloidaler Metalllösungen mittels Pulverisators erzeugte. Derselbe Beobachter sprach dann weiter die Vermutung aus, daß auch die Farben der Schmetterlingsflügel — und zwar nicht bloß die Schillerfarben, sondern auch die Körperfarben derselben — durch optische Resonanz des Lichtes an kleinen Chitinkörnchen zustande kommen; ja, er meinte sogar, daß jede Körperfarbe auf diese Weise entstehe. Zugleich glaubte er feststellen zu können, daß eine Abhängigkeit zwischen der Farbe der betreffenden Schichten und der Größe der in ihnen befindlichen resonierenden Teilchen stattfinde, und zwar soll nach seinen Messungen die Größe dieser Teilchen bei den Schmetterlingsschuppen von der Größe der ganzen Wellenlänge des von ihnen „reflektierten" Lichtes, bei den Metall- und Anilinfarben dagegen von der Größe der halben Wellenlänge sein. Dabei scheint der Verfasser die Begriffe Körperfarbe und Reflexionsfarbe vollkommen durcheinander zu werfen.

Später meinte auch Ehrenhaft, daß man bei der Absorption des Lichtes in kolloidalen Lösungen eine resonanzartige Wirkung anzunehmen habe; jedoch sei hier ein scharfer Unterschied zwischen elektrisch leitenden und nicht leitenden Teilchen zu machen. Im letzteren Falle sei nämlich hier lediglich die gewöhnliche Rayleighsche Theorie der Farben trüber Medien, im ersteren dagegen eine von J.J. Thomson gegebene Modifikation derselben für metallische leitende Teilchen anzuwenden. Die Unterschiede beider Theorien bestehen nach ihm hauptsächlich darin, daß nach ersterer das Maximum der Polarisation bei 90°, nach letzterer aber bei 60° — vom einfallenden Strahle aus gerechnet — liegt, und tatsächlich hat er auch diesen letzteren Polarisationswinkel bei seinen Messungen an kolloidalen Metalllösungen gefunden, während nicht metallische Lösungen dieser Art dafür annähernd 90° ergaben.

Gegen die Anwendung der Thomsonschen Theorie auf diese Erscheinungen erklärte sich später Pockels, der dagegen hauptsächlich geltend machte, daß bei der hohen Periodenzahl der Lichtschwingungen die Leitfähigkeit der Metalle viel geringer sei, als jene Theorie sie annimmt, auch hätten einige auf Veranlassung von Thomson selbst angestellte Messungen auch für Metalllösungen das Polarisationsmaximum bei 90° ergeben.

Auch Mie sagt, daß die Theorie der optischen Resonanz mit sehr unklaren Begriffen arbeite; er hat deshalb durch Steubing die Absorption und Diffusion des Lichtes an Goldlösungen bei verschiedener Größe der Goldteilchen untersuchen lassen, wobei sich zeigte, daß sich weder die Absorptionskurve noch auch die Lage der maximalen Ordinate im Spektrum des diffundierten Lichtes wesentlich mit der Größe der Goldteilchen änderte. Hieraus schließt Mie, daß in diesem Falle von einer optischen Resonanz keine Rede sein könne. Allerdings hält auch er eine Erweiterung der Rayleighschen Theorie in diesem Falle für erforderlich, und gibt auch eine solche in dem Sinne, daß er dabei auch die Absorption eines Teiles der elektrischen Energie der einfallenden Schwingungen durch die Metallteilchen berücksichtigt. Er findet dann, daß bis zu einer Teilchengröße von ca. 100 $\mu\mu$ das von den Metallteilchen seitlich zerstreute Licht fast nur Rayleighsche Strahlung ist, die also ihr Polarisationsmaximum bei 90° hat, und hier vollkommene Polarisation zeigt. Für größere Teilchen dagegen rückt das Polarisationsmaximum nach der Seite des einfallenden Lichtes zu, und zugleich das Maximum der diffusen Reflexion nach der entgegengesetzten Seite.

Die Farben der kolloidalen Goldlösungen erklären sich durch das Zusammenwirken zweier Eigenschaften der Goldteilchen. Diese haben nämlich ein Absorptionsmaximum im Grün und ein Reflexionsmaximum im Rotgelb. Sehr kleine Teilchen reflektieren schwach und absorbieren stark, sie machen daher die Lösung rubinrot. Größere Teilchen absorbieren und reflektieren stark, so daß also im durchgelassenen Lichte das Blau vorwiegt. Die Versuche von Steubing und von Lampa bestätigen im allgemeinen diese Ergebnisse der Theorie.

7. Dispersionsfarben. Die zusammengesetzte Strahlung einer weißen Lichtquelle kann man einesteils durch ein Prisma und anderenteils auch durch ein Gitter in ihre verschiedenen Bestandtile zerlegen, und also die sämtlichen elementaren Farben des Spektrums in reinster Art zur Anschauung bringen. Allerdings gehören zur Herstellung eines solchen Spektrums nicht bloß das Prisma bezw. das Gitter, sondern zugleich auch noch eine in größerer Entfernung davon aufgestellte punkt- oder spaltförmige Lichtquelle. Denn unter freiem und gleichmäßig hellem Himmel z. B. zeigt weder ein Prisma noch ein Gitter auch nur eine Spur eines Spektrums, da eben dann von den von den verschiedenen Seiten her kommenden Strahlen jeder für sich ein besonderes Spektrum erzeugt und alle diese Einzelspektren sich wieder so miteinander mischen, daß ein Farbeneindruck nicht zustandekommt. Das Charakteristische dieser Dispersionsfarben ist nämlich das, daß sie sich stets nur über einen verhältnismäßig kleinen Winkel erstrecken, oder also mit der Aenderung des Einfallswinkels ihren Farbenton ganz erheb-

Digitized by Google

lich viel schneller ändern als irgendeine andere der bisher betrachteten Farbenarten. Bei einem Gitter z. B., dessen Streifenabstand 0,002 mm beträgt, erscheinen bei senkrechtem Einfall des Lichtes zwischen 0 und 90° Austrittswinkel drei vollständige Spektren, dasjenige erster Ordnung zwischen 11 und 21°, dasjenige zweiter Ordnung zwischen 23 und 45° und dasjenige dritter Ordnung zwischen 37 und 90°. Bei größerem Abstand der Gitterfurchen wird die Zahl der Spektren noch größer und dementsprechend der Winkelabstand der Farben noch kleiner.

Ferner ist für diese Farben der Umstand bezeichnend, daß sie immer nur in einer bestimmten Ebene des Raumes ausgesandt werden nämlich in derjenigen, welche beim Prisma senkrecht auf der brechenden Kante und beim Gitter senkrecht auf der Richtung seiner Furchen steht.

Diese beiden Eigentümlichkeiten sind denn auch der Grund, daß man eine solche Dispersionsfarbe in der Natur nur äußerst selten sieht, und zwar vorwiegend auch nur bei künstlichen Lichtquellen, da dann eben die Bedingung der punkt- bezw. spaltförmigen Quelle eher erfüllt ist. So z. B. zeigt sich das Farbenspiel eines Brillanten fast nur bei künstlichem Licht, und dasselbe gilt auch z. B. von dem Irisieren der Perlmutterschalen, während die bei Tageslicht hieran zu beobachtenden Färbungen fast ausschließlich zu den Farben dünner Blättchen gehören, wie auch schon von **Brewster** bemerkt wurde.

Literatur. ***H. v. Helmholtz,*** *Physiologische Optik. 3. Aufl. Hamburg und Leipzig 1909. —* ***W. v. Bezold,*** *Die Farbenlehre im Hinblick auf Kunst und Kunstgewerbe. Braunschweig 1874. —* ***B. Walter,*** *Die Oberflächen- oder Schillerfarben. Braunschweig 1895. —* ***W. Biedermann,*** *Die Schillerfarbe bei Insekten und Vögeln. Jena 1904 (Häckel-Festschrift). Hier findet man über das in der Ueberschrift gekennzeichnete Gebiet ein vollständiges Literaturverzeichnis bis 1904. — Von neueren Abhandlungen darüber sind zu erwähnen:* ***Michelson,*** *Philosophical Magazine, Ser. 6, Bd. 21, S. 554, 1911. —* ***A. Mallock,*** *Proc. Roy. Soc., Ser. A, Vol. 85, S. 598, 1911. — Ueber Farben trüber Medien und Resonanzfarben s.* ***J. W. Strutt (Lord Rayleigh),*** *Philos. Mag., 1871, 1881, 1899. —* ***R. W. Wood,*** *Philos. Mag. (6), Bd. 3 und 4, 1902. —* ***J. Kossonogoff,*** *Physikal. Zeitschr., Bd. 4, 1902. —* ***F. Ehrenhaft,*** *Ann. d. Phys., Bd. 11, 1903. —* ***F. Pockels,*** *Physik. Zeitschr., Bd. 5, S. 152 und 460, 1904. —* ***F. Mie,*** *Ann. d. Phys., Bd. 25, S. 377, 1908. —* ***A. Lampa,*** *Wien. Ber., Bd. 118 und 119, 1909 und 1910.*

B. Walter.

Farben.

Einleitung. Die Begriffe: Farbe, Farbstoff, Pigment, Pigmentfarbstoff. 1. Der Begriff „Farbe“ im maltechnischen Sinne. 2. Die Farbstoffe; Nomenklatur und Einteilung der Malerfarbstoffe; Echtheits- und Reinheitsbegriffe. 3. Technische Anforderungen an Malerfarbstoffe: a) Lichtechtheit. b) Luftechtheit. c) Kalkechtheit. d) Säureechtheit. e) Wasserechtheit. f) Oelechtheit im physikalischen Sinn. g) Verträglichkeit in Mischung mit anderen Farbstoffen. Zinkweißechtheit. 4. Wirkung und Einteilung der Bindemittel. 5. Optische und maltechnische Beziehungen der Farbstoffe zu den Bindemitteln. 6. Chemische Einwirkungen von Bindemitteln auf Farbstoffe. 7. Einteilung der Farben nach Art der Bindemittel: a) Kalkfarben. b) Wasserglasfarben. c) Aquarellfarben. d) Chinesische Tusche. e) Leimfarben. f) Kaseinfarben. g) Temperafarben. h) Oelfarben (Lackfarben). i) Oeldruckfarben. k) Systeme der Künstlerölfarben. l) Pastellfarben, Farbstifte, Bleistifte.

Einleitung. Der Begriff „Farbe“ wird im Deutschen in dreierlei Bedeutungen gebraucht, nämlich zur Bezeichnung 1. der physiologischen Erscheinung der homogenen Lichtarten. 2. der farbigen Erscheinung von Stoffen (Farbstoffen). 3. der malfertigen Gemische von Malerfarbstoffen mit Bindemitteln. Dieser Aufsatz bezieht sich auf den Begriff „Farbe“ nur in letzterer Bedeutung. Die wissenschaftliche Erschließung des Gebietes der Anstrich-, Maler- und Druckfarben ist besonders bezüglich der Wechselwirkungen zwischen den Farbstoffen und den Bindemitteln, wie der Untersuchungsmethoden der letzteren keineswegs abgeschlossen. Die Forschungsgebiete der wissenschaftlichen Malmaterialienkunde sind Chemie, Physik, die fabrikatorische und handwerkliche Praxis und die Kunsthistorie. Es werden im folgenden die Lücken bezeichnet, die noch auszufüllen sind. Farbstoffe oder Pigmente sind farbige Stoffe, die Färbevermögen besitzen, d. h. ihre Färbung anderen Stoffen mitteilen. Man teilt sie in Textilfarbstoffe, Farbstoffe für Glasmalerei und Keramik und Anstrichfarbstoffe im weiteren Sinne (Malerfarbstoffe usw.). Die Anstrichfarbstoffe bedürfen zur Verwendung eines Bindemittels und müssen darin unlöslich sein. Sie sind entweder natürliche oder künstliche, anorganische oder organische. Man teilt sie ein in Erd- und natürliche Mineralfarbstoffe, künstliche anorganische, Farbstoffe aus natürlichen organischen Farbmaterialien pflanzlichen oder tierischen Ursprunges und synthetisch hergestellte organische Farbstoffe (Pigmentteerfarbstoffe).

1. Der Begriff „Farbe“ im maltechnischen Sinne. Unter einer Farbe im maltechnischen Sinne versteht man mechanische Gemenge von Anstrichfarbstoffen usw. mit den üblichen Bindemitteln, die entweder vom Verbraucher für jeweilige Verwendung selbst,

Digitized by Google

oder fabrikatorisch im verbrauchsfertigen Zustande hergestellt oder vom Verbraucher durch Zusätze (Verdünnungsmittel) in denselben versetzt werden.

2. Die Farbstoffe; Nomenklatur und Einteilung der Malerfarbstoffe; Echtheits- und Reinheitsbegriffe. Die Bezeichnung (Deklaration) der Anstrich-, Druck- und Malerfarbstoffe ist im Laufe der Zeit dadurch unsicher geworden, daß sie nicht immer mit ihrer Zusammensetzung übereinstimmt (falsche Substanzbezeichnungen). Diese Uebereinstimmung allein gibt Gewähr für Lieferung nach Bestellung. Mißstände ergaben sich ferner dadurch, daß die Reinheit, d. h. Abwesenheit fremder natürlicher Bestandteile oder absichtlicher Zusätze nicht immer garantiert ist. Man versucht daher seit ca. 30 Jahren in Deutschland und anderen Ländern die Nomenklatur und Deklaration dieser Farbstoffe und der Bindemittelmaterialien auf sichere Basis zu stellen. Diese Maßnahmen gehen in Deutschland von der Münchener Gesellschaft zur Förderung rationeller Malverfahren aus. Diese hat unter anderem folgende Nomenklaturgrundlagen geschaffen. 1. Stoff- oder Substanzbezeichnungen sind Namen von Farbstoffen usw., die ihre Zusammensetzung unzweifelhaft oder andeutungsweise (Vulgärnamen) angeben. 2. Ursprungs- oder Herkunftsbezeichnungen geben über den Fundort, jenen der Fabrikation, von wo aus sie in den Handel kommen, Aufschluß. 3. Qualitätsbezeichnungen geben über die Zusammensetzung der Materialien keinen sicheren Aufschluß, bezeichnen aber bestimmte Verwendungsmöglichkeiten derselben. 4. Nuancebezeichnungen drücken die Aehnlichkeit des Farbtones eines Farbstoffes mit in der Natur vorkommenden farbigen Stoffen usw. aus. 5. Phantasiebezeichnungen geben über Zusammensetzung, Herkunft und Qualität keinerlei Aufschluß (geschützte Namen). 6. Beinamen oder Synonyma sind die neben der Substanz- oder sonst handelsüblichen Bezeichnung gebräuchlichen Namen für denselben Farbstoff. 7. Falsche Substanzbezeichnungen sind Namen, welche eine andere Zusammensetzung eines Materials vortäuschen als es besitzt (z. B. gelber Ultramarin für Barytgelb, Zinnober für Zinnoberersatzfarbstoffe). Es wurde durch Vereinbarung der deutschen Fabrikanten- und Konsumentengruppen festgesetzt, daß Farbnamen, deren Substanz als farbgebender Stoff in den angebotenen oder gelieferten Produkten nicht enthalten ist, nicht benutzt werden dürfen, sondern das Wort „Imitation" (Ersatz) beim Farbnamen tragen müssen. 8. Ersatzmittel (Surrogate) sind Materialien, welche bei anderer chemischer Zusammensetzung dieselben technischen Verwendungsmöglichkeiten haben sollen, wie die zu ersetzenden bezw. die gewisse Mängel der ersteren nicht besitzen. Kein Ersatzmittel kann alle Eigenschaften des zu ersetzenden aufweisen.

Zur Schaffung sicherer Grundlagen im Handel und in der Verwendung der Malmaterialien wurden ferner die Reinheits- und Echtheitsbegriffe umgrenzt. Man unterscheidet bei fabrikatorisch hergestellten Farbstoffen usw. chemische von technischer Reinheit. Diese können nur technisch rein verlangt werden. Technisch rein ist ein fabrikatorisch hergestellter Farbstoff, der ein chemisches Individuum ist, dann, wenn er neben den integrierenden Bestandteilen keine unzulässigen Mengen fremder enthält. Zur Garantierung der technischen Reinheit ist von den Fabrikanten vorgeschlagen, diese bei Bestellung durch Zusatz des Kennwortes „rein" beim Farbstoffnamen zu fordern. Echt im chemischen Sinne ist ein Farbmaterial usw., wenn seine chemische Zusammensetzung dem Namen entspricht. Naturecht sind natürliche Farbstoffe (Erdfarben), wenn sie so, wie sie in der Natur vorkommen, geliefert werden und nur solchen Aufbereitungsarbeiten unterworfen wurden, durch welche keine fremden Stoffe hinzutraten. Fälschung liegt vor, wenn die Zusammensetzung eines Farbmaterials nicht der Deklaration entspricht; Verfälschung, wenn es neben dem durch den Namen gekennzeichneten Stoff noch fremde absichtlich zugesetzte, keinen technischen Effekt bewirkende enthält (Verdünnen, Strecken der Farbstoffe usw.). Unter Schönungen versteht man Zusätze von fremden anorganischen oder organischen Farbstoffen zu natürlichen oder künstlichen zum Zwecke der Verbesserung der Nuancen (A. Eibner, Der Reinheitsbegriff bei Malmaterialien. Farbenztg. 15, 1539 [1910]). Die Malerfarbstoffe usw. teilt man in der folgenden Weise ein: 1. Grundfarbstoffe sind solche natürliche oder künstliche, naturreine oder technisch reine Farbstoffe, deren Farbton nicht durch mechanisches Mischen zweier oder mehrerer erzielt werden kann. 2. Mischfarbstoffe sind Farbstoffe, die durch mechanisches Vermischen gleicher oder verschiedener Mengen zweier oder mehrerer bunter Grundfarbstoffe erhalten werden. 3. Verschnittfarbstoffe sind mechanische Gemenge von naturechten Grund- oder Mischfarbstoffen mit verdünnenden, nicht buntfarbigen Zusätzen (Spat, Kreide, Gips usw.), die dem Zwecke der Verbilligung dienen. 4. Substratfarbstoffe sind natürliche oder künstliche Farbstoffe, bei deren Bildung oder Herstellung ein weißer Füllstoff vorhanden ist oder verwendet werden muß, um die verlangte Nuance oder sonstige maltechnische Qualität (Verteil-

Digitized by Google

barkeit, Deckfähigkeit usw.) herzustellen. Natürliche Substratfarbstoffe sind u. a. die Ocker. Sie enthalten Eisenhydrate als färbendes Prinzip und Ton als Unterlage. Künstliche Substratfarbstoffe sind: Cadmiumgelb zitron, Chromgelb zitron. Ersteres enthält Cadmiumoxalat oder -carbonat als Unterlage, letzteres Bleisulfat als solche. Diese Stoffe verhindern, daß die Partikeln des färbenden Prinzipes zu größeren Komplexen zusammentreten und so eine andere Lichtabsorption ausüben, als die zum hellen Gelb führende. Außerdem sind Substratfarbstoffe das Cadmiumrot (A. Eibner, Ueber Cadmiumgelb usw., Farbenztg. 13, 1511 (1908)), die Neapelgelbe, Kobaltblaue, Kobaltgrüne, Ultramarine usw. (Lunge, Chem.-Techn. Untersuchungsmethoden 6. Aufl., 4. Bd., Abschnitt Anorganische Farbstoffe). Zu den Substratfarbstoffen zählen auch die Krapplacke usw. und Teerfarblacke.

3. **Technische Anforderungen an Malerfarbstoffe.** Neben der Forderung der Naturechtheit bezw. technischen Echtheit und Reinheit der Malerfarbstoffe, soweit sie nicht als Verschnitt- bezw. Substratfarbstoffe deklariert sind, stellt man bezüglich der technischen Verwendbarkeit nachfolgende Anforderungen, die, falls sie aus zwingenden Gründen nicht erfüllt werden können, zur Gruppenteilung führen. Ein Malerfarbstoff soll sein: a) lichtecht, b) luftecht, c) kalkecht, d) säureecht, e) wasserecht, f) ölecht im physikalischen Sinne, g) verträglich in Mischung mit anderen Farbstoffen.

3a) Lichtechtheit. Bezüglich Lichtechtheit verhalten sich die Malerfarbstoffe usw. sehr verschieden. Als absolut lichtecht können nur die Erdfarbstoffe und einige künstliche anorganische gelten. Prinzipielle Unterschiede zwischen der Lichtechtheit der künstlichen anorganischen und organischen Malerfarbstoffe lassen sich nicht feststellen. Es gibt sehr lichtunechte anorganische Malerfarbstoffe, so die meisten Sorten von Chromgelb, auf nassem Wege hergestellte Zinnober und andererseits sehr lichtechte organische, wie die Krapp- und Alizarinlacke und besonders die neueren Pigmentfarbstoffe der Anthrachinonreihe (Indanthrene), Heliofarbstoffe, Säurealizarinblaulacke, Thioindigos, Cibafarbstoffe usw., die im Wasserfarbenauftrag im Vollton, also ohne Verdünnung mit Weiß teilweise die dreifache Lichtechtheit des Alizarinlackes erreichen. Die noch häufig zu findende Ansicht, daß die alten Malerfarbstoffe pflanzlichen und tierischen Ursprungs durchaus lichtechter seien als synthetisch hergestellte Teerfarbstoffe ist unzutreffend. Gelblacke, Gummigutt, Karmin usw. zählen zu den lichtunechtesten Malerfarbstoffen; Pflanzenindigo ist lichtunechter als synthetischer und als Wasserfarbe sehr viel unechter als Thioindigos und die oben erwähnten anderen Teerfarbstoffe (über das Verhalten der indigoiden Farbstoffe als Oelfarben vgl. 6a).

Ueber die Lichtwirkungen auf Malerfarbstoffe sind die Forschungen ebensowenig abgeschlossen, wie über die auf Textilfarbstoffe. Sie äußern sich entweder im Verblassen oder Verdunkeln. Ersteres tritt am häufigsten auf. In letzter Zeit wurden neue Beobachtungen gemacht, die auf beschleunigende Einflüsse durch gewisse Bindemittel und auch durch andere Farbstoffe hinweisen (vgl. 6a und b). Man unterscheidet bei Malerfarbstoffen chemische und physikalische Lichtwirkungen und Uebergänge letzterer in erstere; die chemischen bilden die Mehrzahl und beruhen auf Oxydation wie bei Bleiglätte, Cadmiumgelb und den organischen Farbstoffen, oder auf Reduktion, wie bei Bleibraun, Chromgelb, den Pariserblauen usw. Die physikalischen Lichtwirkungen bei Jodquecksilber und Zinnober sind durch Aenderung der Struktur und Kristallform verursacht, wodurch die Lichtabsorption sich ändert. Sie können bei Anwesenheit von Ueberträgern in chemische übergehen. So wird die gelbe Modifikation des Jodquecksilbers durch Reduktion grauviolett, der geschwärzte Zinnober durch Oxydation gebleicht (vgl. unter 3g, Zinkweißunechtheit). Es gibt auch hier reversible und irreversible Lichtwirkungen. Bei manchen Farbstoffen wie den Zinnobern und Pariserblauen beginnt die Wirkung in reversibler Weise und wird später irreversibel (vgl. A. Eibner, Ueber Lichtwirkungen auf Malerfarbstoffe. Chem. Ztg. 1911, 753; derselbe, Ueber technische Prüfungsmethoden von Malerfarbstoffen und die Verwendbarkeit der neuen Pigmentteerfarben in der Kunstmalerei. Farbenztg. 16, 1390, (1911); K. Gebhardt, Ueber die Einwirkung des Lichtes auf Farben. Marburg 1908; derselbe, Zusammenhang zwischen Lichtempfindlichkeit und Konstitution von Farbstoffen. Journ. f. prakt. Chem. 84 (1911) u. a. a. O.). Die Agentien, welche die chemischen Lichtwirkungen auslösen, sind der Sauerstoff und das Wasser der Luft. Beschleunigende Wirkung üben hygroskopische Stoffe aus, wie Glyzerin (vgl. 7c, Aquarellfarben). Ueber den Einfluß der Glasbedeckung auf die Lichtechtheit von Farbstoffen vgl. A. Eibner, Technische Prüfungsmethoden von Malerfarbstoffen, l. c.

3b) Luftechtheit. Luftechtheit (Wetterechtheit) ist die relative Widerstandsfähigkeit der Malerfarbstoffe und Farbenanstriche gegen die Atmosphärilien, also gegen Sauerstoff, Wasser, Kohlensäure, schweflige Säure usw. (vgl. 3d, Säureechtheit).

3c) Kalkechtheit. Kalkechte Farbstoffe zeigen chemische Indifferenz gegen frisch ge-

Digitized by Google

löschten kieselsäurearmen Kalk, die sich im Stehenbleiben der Nuance in diesem äußert. Man unterscheidet kalkechte und kalkunechte Malerfarbstoffe. Zu letzteren gehören Bleiweiß, die Chromgelbe, Pariserblaue usw. Kalkfarben sind nicht nur Farbstoffe, die durch gelöschten Kalk nicht chemisch verändert werden, sondern solche, die den übrigen Bedingungen eines licht- und wetterfesten Malerfarbstoffes entsprechen. Deshalb sind alle alten und die meisten neueren organischen Farbstoffe keine Kalkfarben. Eine Ausnahme bilden u. a. die Kalkgrüne, die man als Grün- und Grautonlacke grüner Triphenylmethanfarbstoffe auffassen kann.

3d) Säureechtheit. Der Begriff Säureechtheit bei Malerfarbstoffen bezieht sich nur auf ihr Verhalten gegen schweflige Säure und Schwefelwasserstoff. Die Ultramarine sind sehr empfindlich gegen erstere und Bleiweiß gegen letzteren.

3e) Wasserechtheit. Wasserechtheit wird von allen Malerfarbstoffen verlangt, die in Wasserfarbentechniken verwendet werden, d. h. sie sollen auch nicht spurenweise in Wasser löslich sein, da die gefärbte Lösung eines wasserunechten Farbstoffes durch Kapillarität in die darüber gelegten Schichten dringen und diese anfärben würde (durchschlagende Farbstoffe). Es gibt einige Malerfarbstoffe, die nicht ganz unlöslich in Wasser sind, wie Indischgelb und Zinkgelb. Diese färben auch die Papierfaser an, so daß derartige Farbenaufträge schlecht abwaschbar sind. Unter den Pariser- und Preußischblauen finden sich Sorten, die lösliches Berlinerblau enthalten.

3f) Oelechtheit. In gleicher Weise muß ein Farbstoff, der als Oelfarbe oder im Buntdruck verwendbar sein soll, ölecht sein. Es handelt sich hier nur um die eventuell teilweise Löslichkeit von Malerfarbstoffen in den öligen Bindemitteln im physikalischen Sinne. Oelunechtheit wurde zuerst bei den vor ca. 30 Jahren hergestellten, mit Teerfarbstoffen geschönten Erdfarben beobachtet (blutende, beizende Farbstoffe). Die neueren Pigmentteerfarbstoffe sind mit wenigen Ausnahmen ölecht. Dadurch haben sie neben ihrer Lichtechtheit sich als Pigmentfarbstoffe besonders für Buntdruck eingeführt. Das bekannteste und älteste Beispiel eines ganz ölunechten Malerfarbstoffes ist der Asphalt. Er ist in Terpentinöl sehr leicht, in Leinöl usw. reichlich löslich und schlägt, da er außerdem das Trocknen stark verzögert, durch die Untermalung durch und verursacht so das Nachdunkeln. Teilweise öllöslich sind alle Farbstoffe mit bituminösen Bestandteilen, wie Rußbraun, Bister, Kölner Umbra, Kasseler Braun. Die Ermittelung der Oelechtheit erfolgt durch die Auslauf- und die Aufstrichprobe. Bei ersterer digeriert man den Farbstoff mit einem Gemenge von $^2/_3$ Leinöl und $^1/_3$ Terpentinöl bei gewöhnlicher Temperatur oder bei ca. 70° C, gießt auf Filtrierpapier und beobachtet die Färbung der Auslaufzone. Bei der Ueberstrichprobe streicht man den Farbstoff fett in Oel abgerieben auf nicht saugende Unterlage und bringt auf diesen Aufstrich, sobald er eben klebefrei trocken geworden, magere Zinkweißölfarbe in Flecken oder Streifen auf. Das Bindemittel der unteren Schicht zieht sich dann in den Ueberstrich und färbt diesen, wenn der zu prüfende Farbstoff ein durchschlagender ist.

3g) Verträglichkeit in Mischung. Verträglichkeit in Mischung ist eine an Malerfarbstoffe zu stellende Hauptanforderung. Man versteht hierunter 1) das Ausbleiben chemischer Wechselzersetzung zweier Farbstoffe, 2) die chemische Unveränderlichkeit von Farbstoffen durch katalytische Wirkung anderer eventuell unter Mitwirkung von Bindemitteln. Berücksichtigt man, daß die Malerfarbstoffe nicht durchwegs chemisch indifferente Stoffe sind, so ist zu verwundern, daß die wissenschaftliche Malmaterialienkunde nicht längst die Bedingungen festgelegt hat, unter welchen Malerfarbstoffe verträglich sind.

Einzelne Fälle von Wechselzersetzungen bei diesen waren schon im Mittelalter bekannt; so jene des Grünspans mit Auripigment und Realgar. Trotzdem begann man erst vor nicht zu langer Zeit dieses Gebiet systematisch zu bearbeiten. Der bekannteste Fall erwähnter Art ist die rasch verlaufende Wechselwirkung zwischen den Cadmiumfarbstoffen und den Kupfergrünen usw., die zur Bildung von Schwefelkupfer führt und damit zur Mißfärbung des ursprünglichen Mischtones. Der Eintritt dieser Wechselzersetzung wird durch Oelbindemittel nicht verhindert. Hierher gehören auch die vermeintlichen Wechselzersetzungen zwischen schwefelhaltigen Farbstoffen und Bleifarben, wie zwischen Zinnober, Cadmiumgelben, Ultramarinen, Lithopon und Bleiweiß, die erfahrungsgemäß nicht oder nicht in starkem Grade auftreten und durch Oelbindemittel verhindert werden (vgl. A. Eibner, Malmaterialienkunde, Kap. 9). Es wurde vor einiger Zeit bekannt, daß gewisse weiße Farbstoffe die Lichtechtheit einer Reihe von bunten Malerfarbstoffen durch katalytische Wirkung beeinflussen (A. Eibner, Ueber Lichtwirkungen auf Malerfarbstoffe l. c. und derselbe, Ueber technische Prüfungsmethoden von Malerfarbstoffen usw. l. c.). Zu diesen gehört das Zinkweiß, das in Mischung mit anorganischen Farbstoffen wie Chromgelb, Cadmiumgelb, Pariserblauen, den meisten organischen, einschließlich der Pigmentteerfarbstoffe, deren Lichtechtheit in zum Teil

Digitized by Google

außerordentlichem Grade (Pariserblau) beeinträchtigt. Es handelt sich hier also um eine unter Lichtwirkung zustande kommende Unverträglichkeit von Malerfarbstoffen. A. Eibner nannte diese Eigenschaft die Zinkweißunechtheit derselben. Nach neueren Beobachtungen scheinen auch andere weiße Farbstoffe wie Kreide usw. ähnliche Wirkungen auszuüben, ohne daß diese lediglich auf den durch den weißen Farbstoff bewirkten Verdünnungsgrad des bunten zurückzuführen wäre. Ueber Beeinflussung von organischen Farbstoffen durch anorganische oder ersterer untereinander liegen zurzeit nur einige Beobachtungen vor. Bezüglich der Mitwirkung von Bindemitteln bei diesen und anderen Erscheinungen vgl. Abschnitt 6.

4. Wirkung und Einteilung der Bindemittel. Die Bindemittel haben den Zweck, durch ihre Klebefähigkeit im eingetrockneten Zustande die Partikeln der Farbstoffe unter sich und die Malschicht (Druckschicht) am Grund haften zu machen, außerdem licht- und luftempfindliche Farbstoffe zu schützen und keine schädlichen Einflüsse auf sie auszuüben (vgl. 6). Man teilt die Bindemittel nach der Zusammensetzung ein in anorganische und organische. Von ersteren kommen in Betracht: gelöschter Kalk, Wasserglas; von letzteren die wasserlöslichen Bindemittel; Pflanzenleime, arabisches Gummi, Kirschgummi, Traganth; die künstlichen stickstofffreien Klebemittel Dextrin und Stärkeleime; dann die tierischen Knochenleime inklusive Hausenblase. Von in Wasser unlöslichen organischen Stoffen werden verwendet Kasein in Form löslicher Salze; von mit Wasser emulgierbaren das Eigelb. Ferner die fetten trocknenden Oele, Leinöl, Mohnöl, Nußöl, seltener Sonnenblumenöl; dann chinesisches Holzöl; neuerdings Sojabohnenöl und Perillaöl. Versuchsweise wurden für Künstlerölfarbenfabrikation Candlenußöl und Nigeröl verwendet. Außerdem finden Anwendung als Bindemittel oder Bestandteile derselben fette Oelfirnisse, Oellacke, Harzlacke, Oelemulsionen (vgl. 7g, Temperafarben) und Balsame. Als Lösungs- bezw. Verdünnungsmittel dienen Wasser, zur Herstellung der wässerigen Bindemittel, Terpentinöl und dessen Ersatzmittel. Malmittel sind Hilfsmaterialien der Oel- und Temperamalerei. Man unterscheidet schnell trocknende oder Sikkative und langsam trocknende. Erstere sind entweder Oelfirnisse mit starkem Gehalt an Trockenstoffen (Bleisikkative, Sikkativ de Courtrai, Terebine) oder Oelharzlacke (Sikkativ de Haarlem); letztere hochsiedende ätherische Oele wie Rosmarin-, Spick-, Lavendel- und Nelkenöle, auch Copaivaöle. Firnisse sind Pflanzenöle (Leinöl, Mohnöl, Nußöl usw.), die durch Erhitzen mit Trockenstoffen (Bleiglätte, Mennige, Braunstein) auf höhere Temperatur (gekochte Firnisse, alte auf Firnisbereitung) oder durch Behandlung bei mittleren Temperaturen mit Metallverbindungen der Leinölsäuren (Linoleate) oder solchen des Kolophons (Resinate) die Eigenschaft gewonnen haben, in dünner Schicht aufgetragen rasch zu trocknen. Man unterscheidet Spritlacke, z. B. Schellack, eine Auflösung des Stocklackes in Alkohol, Essenzlacke, d. h. Lösungen von Harzen wie Mastix, Dammar, weichen Kopalen in Terpentinöl und Oellacke, d. h. Lösungen der Rückstände der trockenen Destillation in fetten und ätherischen Oelen unlöslicher Naturharze in Oelfirnissen (Lackmassen), die mit Terpentinöl oder dessen Ersatzmitteln auf Streichkonsistenz verdünnt werden. Auf diese Weise werden die Bernstein- und Kopallacke hergestellt. Ersatzmittel hierfür sind u. a. die mittels Kalk- und Zinkverbindungen des Kolophons oder Estern derselben (Schaalsche Lackester) oder mit durch Erhitzen gehärtetem Kolophon (Ambrol) hergestellten Harzlacke oder Kompositionslacke.

Der Trocken- und Haftprozeß der Bindemittel. Die wässerigen Bindemittel trocknen durch Verdunsten des Wassers und hierbei stattfindende chemische Veränderung der anorganischen Bindestoffe Kalkhydrat bezw. Wasserglas. Die pflanzlichen und tierischen Leime trocknen nur durch Verdunsten des Wassers. Unlöslichkeit kann bei Knochenleim und Kasein durch Besprengen der Bildfläche mit Formalinlösung oder essigsaurer Tonerde bewirkt werden. Die Adsorption von Wasser durch diese kolloidalen Stoffe und das allmähliche Abgeben desselben nach dem Verdunsten des Lösungswassers kann zu Volumveränderungen der Farbschicht führen, die das Aufblättern der Farbschicht verursachen (vgl. 7e). Kasein und Eiweiß geben Haftfestigkeit durch chemische Verbindung mit dem Kalk des Malgrundes bezw. durch Unlöslichwerden des Kaseinkalkes beim Eintrocknen. Die Haftfestigkeit der Farbenschicht ist bedingt durch die Größe ihrer Adhäsion am Malgrund und die Kohäsion zwischen Farb- und Bindemittelmaterial. Die fetten trocknenden Oele trocknen durch Sauerstoffaufnahme unter Bildung von Oxyglyzeriden (Linoxyn), sowie durch Polymerisation unter Lichtwirkung (Genthe, Leinöltrockenprozeß; Fahrion, Die Chemie der trocknenden Oele, Berlin 1911). Bei den Oelfirnissen werden diese Vorgänge durch die Trockenstoffe beschleunigt. Der Trockenprozeß beginnt hier an der Oberfläche, da diese mit dem Sauerstoff in Berührung steht und schreitet nach der Tiefe vor. Bei dickeren Schichten der Farben entstehen durch die hierdurch auftretende Volumvergrößerung und das Antrocknen der oberen Schicht

Digitized by Google

Spannungszustände, die **Runzelbildung** veranlassen. Oellacke trocknen zunächst durch Verdunsten des Verdünnungsmittels (Terpentinöl usw.), dann durch Sauerstoffaufnahme. Es kommt dadurch bei diesen zu geringerer Runzelbildung als bei fetten trocknenden Oelen und deren Firnissen. Harzessenzlacke trocknen fast ausschließlich durch Verdunsten des Lösungsmittels. Runzelbildung tritt daher hier nicht auf. Die hochsiedenden ätherischen Oele und Balsame trocknen fast ohne Verdunstung und unter schwacher Sauerstoffaufnahme. Für die Nomenklatur der Bindemittel sind dieselben Festsetzungen maßgebend wie für die Farbstoffe. Stoff- oder Substanzbezeichnungen dürfen nicht auf Surrogate übertragen werden. Die wissenschaftliche Wertbestimmung der Bindemittel ist infolge ihrer meist komplizierten Zusammensetzung und teilweisen Fehlens der analytischen Methoden zur quantitativen Bestimmung derselben wie jener der Verfälschungen zurzeit noch nicht allfällig sicher. **Emulsionen** als Farbenbindemittel sind Verteilungen öliger Bindemittel, die mittels eines emulgierenden Agens bewirkt werden. Zur Herstellung einer Emulsion bedarf es also nur dreier Stoffe: des Wassers, des zu emulgierenden Oeles und des emulgierenden Stoffes. Die Emulsionen bilden die Bindemittel der Temperafarben (s. 7g).

5. **Optische und maltechnische Beziehungen der Farbstoffe zu den Bindemitteln.** Diese sind für die naturwissenschaftliche Entwickelung der Maltechnik von besonderer Bedeutung. 5a) **Chromatische Veränderungen der Farbpulver durch Bindemittel; optisches Verhalten der Farben beim Eintrocknen.** Die Farbstoffpulver sind Systeme zweier optischer Medien von verschiedener Lichtbrechbarkeit bezw. Absorption, von Luft und Farbstoffkorn. An der Grenze beider findet im Farbstoff, falls er ein bunter ist, teilweise Absorption und Reflexion und außerdem diffuse Reflexion weißen Lichtes statt Tritt an Stelle der Luft ein Bindemittel, so wird wegen des größeren Brechungsvermögens desselben die diffuse Reflexion des weißen Lichtes (Oberflächenlicht) ganz oder teilweise aufgehoben und das Licht dringt tiefer in ihn ein. Deshalb erscheint er im Bindemittel tiefer gefärbt als im Pulver. Ist er ein Stoff von relativ geringem Lichtbrechungsvermögen und hat das Bindemittel annähernd den gleichen Brechungsindex, so erscheint er darin relativ durchsichtig (lasierend). Sind die Indizes beider stark verschieden, so erscheint die Farbe relativ undurchsichtig (deckend). Verdunstet das Bindemittel beim Auftrocknen der Farbe größtenteils, so tritt an Stelle desselben Luft und dadurch wieder eine starke Brechungsdifferenz, d. h. diffus reflektiertes weißes Licht auf. Daher trocknen die Kalk-, Fresko-, Mineral-, Leim- und Aquarellfarben relativ hell auf. Die Temperafarben ändern sich, da sie Oel enthalten, beim Trocknen weniger als erstere und die Oel-, Oelharz- und Harzfarben bleiben hierbei im optischen Effekt unverändert bezw. ändern sich nur wenig, wenn ein Teil des Bindemittels (Terpentinöl) verdunstet oder nach unten austritt (Einschlagen). Pastellfarben werden nur beim Fixieren etwas dunkler. Umgekehrt ändern sich Oelfarben beim Firnissen wenig; Temperafarben stark. Auch die spezifischen Unterschiede in der Erscheinung der einzelnen Malereien beruhen auf den erwähnten optischen Beziehungen zwischen den Farbstoffen und Bindemitteln. Der Lüster der Freskomalereien rührt von der relativen Lichtdurchlässigkeit des kristallinischen Kalksinters her. Mineralmalereien besitzen ihn nicht, weil das Bindemittel hier amorph ist. Kaseinwandmalereien erreichen aus gleichem Grunde nicht den Lüster der Fresken. Oelharz- und Harzmalereien haben mehr Tiefenlicht als Temperaöl- und besonders Oelwachsmalereien, weil die Harze größere Brechungsindizes besitzen als die fetten Oele. Es sind hier daher die Brechungsdifferenzen zwischen Farbstoff und Bindemittel geringer als bei Oelmalereien.

5b) **Deckfähigkeit; Bestimmung derselben; Lasurfarben.** Die Deckwirkung von Malerfarben ist das Resultat der optischen Wirkung der Farbstoffe auf das Licht unter Mitwirkung der Bindemittel. Sie ist für jeden Farbstoff eine Funktion der optischen Eigenschaften beider. Bei den Farbstoffen kommt zunächst der Grad der Lichtabsorption in Betracht. Schwarze und dunkle Farbstoffe decken infolge fast totaler oder starker Lichtabsorption. Die Deckwirkung ist hier unabhängig vom spezifischen Gewicht des Farbstoffes. Jene der weißen und hellbunten dagegen ist in erster Linie abhängig von diesem und der dadurch bedingten Größe der Lichtbrechung bezw. Reflexion. Doch ist das spezifische Gewicht für die Deckwirkung der schweren Farbstoffe nicht ausschlaggebend. Mitwirkend sind hier noch Größe und Gestalt des Farbkornes, sowie kristallinische bezw. amorphe Ausbildung, da auch die Zahl der stattfindenden Reflexionen die Größe der Deckwirkung bedingt. Der Hauptbetrag derselben wird durch totale Lichtreflexion im Farbstoffkorn unter Mitwirkung der noch im Bindemittel stattfindenden diffusen Reflexion (Erscheinung trüber Medien) hervorgebracht. Von demselben Stoff deckt also die amorphe Form besser als die kristallinische, weil die Zahl der Reflexionen in ersterer die größere ist. Der Betrag der Deckfähigkeit einer angeriebenen

Digitized by Google

Farbe ist gleich der Differenz der Brechungsindizes des Farbstoffes und des gewählten Bindemittels. Die Bestimmung der Deckfähigkeit von Malerfarben war in den letzten Jahren Gegenstand zahlreicher Erörterungen (vgl. Farbenztg. Jahrgänge 13 bis 17; A. Eibner, Ueber technische Prüfungsmethoden von Malerfarbstoffen usw. l. c.). Es fehlen zurzeit Vereinbarungen über die zweckmäßigste Methode. Die beiden am häufigsten verwendeten sind die Mischmethode und die Aufstrichmethode. Sie werden ausschließlich zur Prüfung weißer Farbstoffe verwendet. Nach ersterer werden gleiche Gewichtsmengen der zu prüfenden Farbstoffe mit gleichen Mengen eines Indikatorfarbstoffes (Ultramarin, Rußschwarz) im Pulver innig gemengt und in Oel abgerieben. Die Mischung, die den helleren Ton zeigt, gilt als jene, die den deckenderen weißen Farbstoff enthält. Bei Anwendung von im spezifischen Gewicht sehr verschiedenen Farbstoffen wie Bleiweiß und Zinkweiß erhält man nach dieser Methode unrichtige Resultate, da die verwendeten Volumina der zu prüfenden Farbstoffe ungleich sind. Es ergibt sich dann das Resultat, daß Zinkweiß besser deckt als Bleiweiß. In diesen Fällen liefert diese Methode nur bei Anwendung gleicher Volumina der Farbstoffe richtige Resultate. Von den Aufstrichmethoden ist jene am einwandfreiesten, wobei die mit gleichen Volumen der Farbstoffe aus gleichen Volumen Oel hergestellten Farben in mehrmaligem, nicht deckenden Anstrich bis zur erreichten Deckfähigkeit gestrichen und die Zahl der hierzu nötigen Aufträge, sowie die verbrauchten Farbmengen bestimmt werden. Zur Feststellung der erreichten Deckfähigkeit bedient man sich schwarzer Linien oder Figuren auf dem Malgrunde.

Lasurfarben sind Farben, bei welchen die Brechungsdifferenz zwischen Farbstoff und Bindemittel gering ist. Zur Bestimmung derselben kann jene des Brechungsexponenten des Farbstoffes in einem Medium von bekannter Brechung in der Ausbildung von Le Blanc (Zeitschrift f. phys. Chemie **10**, 433 (1892)) dienen. Es wird im Refraktometer von Pulfrich der Brechungsexponent einer Flüssigkeit ermittelt, in der der zu prüfende Farbstoff durchsichtig erscheint. Diese Methode kann nicht auch zur Ermittlung der Deckfähigkeit von Farbstoffen verwendet werden, weil man zurzeit keine Flüssigkeit mit Brechungsexponenten über 2,0 kennt (Phosphor in CS_2), während die Brechungsexponenten der meisten Deckfarbstoffe größer als 2 sind. Die Ermittlung der Lasurfähigkeit von Farben erfolgt zurzeit auf rein empirischem Wege nach Typ durch Vergleich der Durchsichtigkeitsgrade auf Glasplatten.

5c) Färbevermögen, Ausgiebigkeit. Unter Färbevermögen versteht man die relative Fähigkeit eines bunten oder schwarzen Farbstoffes, einem weißen oder bunten bei der Mischung die eigene Färbung mitzuteilen. Färbevermögen ist nicht identisch mit Deckvermögen, da es sich hier um eine optische Erscheinung handelt, die an der Oberfläche der Farbschicht durch additionelle Mischung eines bunten Farbtones mit Weiß zustande kommt, während die Deckfähigkeit eine Tiefenwirkung eines einzigen Farbstoffes ist. Daher liefert die Mischmethode zur Ermittlung der letzteren keinen sicheren Anhalt, wenn auch ersichtlich ist, daß ein stark deckender Farbstoff eine stark entfärbende Wirkung auf einen bunten ausüben muß. Andererseits gibt es ausgesprochene Lasurfarbstoffe (Pariserblaue, Teerfarbstoffe), die bei geringer Deckwirkung sehr großes Färbevermögen zeigen.

5d) Oelverbrauch und Oelen der Oelfarben usw. Eine Schwierigkeit bei der Fabrikation der Künstlerölfarben bildet der verschieden große Oelverbrauch der einzelnen Farbstoffe. Er ist hauptsächlich bedingt durch die Verschiedenheit ihrer spezifischen Gewichte, wodurch gleiche Gewichtsmengen verschiedene Volumina ergeben. Spezifisch leichte Farbstoffe verbrauchen daher gewöhnlich, wenn auch nicht ausnahmslos mehr Oel als schwere, um gleich malfertige Farben zu liefern. Es spielen hier auch die Benetzbarkeit, Größe und Form, Glätte, Porosität des Farbkornes, also rein physikalische Momente eine Rolle. Diese bedingen im Zusammenhang mit dem spezifischen Gewicht auch Ungleichheiten in der Kohäsion der Farbstoffe mit dem Oel, die sich im langsamen oder raschen Absetzen und dem sogenannten „Oelen" der Tubenölfarben, sowie im Unterschied in ihrem Verhalten unter dem Pinsel, der Malfähigkeit äußern. Es ist noch nicht gelungen, diese Unterschiede in hinreichender Weise abzugleichen (vgl. 7i).

6. Chemische Einwirkungen von Bindemitteln auf Farbstoffe. 6a) Oelunechtheit im chemischen Sinne. Die früher fast allgemein verbreitete Annahme, daß die Bindemittel der Malerfarben usw. auf die Farbstoffe durch Abschluß derselben von der Luft schützend einwirken und keinerlei Veränderungen derselben bewirken, hat sich in den letzten Jahren als irrig erwiesen. Seit langem kannte man chemische Wirkungen fetter Oele, unter den Bezeichnungen Bleiverseifung und Zinkverseifung. Man schreibt die Wetterbeständigkeit von Oelbleiweißanstrichen dem allmählichen Eintritt der ersteren zu, wobei sich Bleioleate bilden, die der Hydrolyse weniger stark unterliegen wie Zinkoleate. Neuerdings nahm W. Flatt (Farbenztg. 15, 227 (1910)) auch bei Lithopon Verseifung

Digitized by Google

des Zinksulfids an. Wenig bekannt ist, daß auch Erdfarben, wie Umbra, dann Englischrote und Caput mortuum, als Künstlerölfarben beim Lagern teilweise Verseifung erleiden und so ölunecht werden, indem das Bindemittel angefärbt wird und durch Eintritt in obere Malschichten Nachdunkeln veranlaßt. Das Vergrünen künstlicher Kupferblaue im Oelbindemittel besteht in Bildung von ölsaurem Kupfer. Kupferhaltige, aus Kiesabbränden hergestellte Eisenrote färben das Oelbindemittel grünbraun. Gegenüber diesen lästigen, aber in ihren Wirkungen nicht stark hervortretenden Erscheinungen verdient eine zuerst von E. Täuber (Chem. Ztg. 1908, 1032, 1909, 417) beobachtete und später von A. Eibner weiter verfolgte besondere Beachtung. Täuber ermittelte, daß das im Wasserfarbenbindemittel außerordentlich lichtechte Thioindigorot (Violettstich) und Indigo mit weißen Farbstoffen gemischt im Oel schon im Dunkeln, im Lichte in kürzester Zeit völlig ausbleichen. Es handelt sich hier nicht ausschließlich um katalytische Wirkung der weißen Farbstoffe, da Thioindigorot und Indigo gemischt mit Zinkweiß als Wasserfarben keineswegs rasch verblassen. Täuber nahm Reduktion dieser Farbstoffe durch das Oel an, Eibner Oxydation und übertragende Wirkung des letzteren unter Mitwirkung des Lichtes. Harzbindemittel (Mastix-Dammarlack) und Oellacke verändern sie nicht bezw. in geringerem Grade. Die Bleichwirkung ist also durch den Trockenprozeß der fetten Oele verursacht (A. Eibner, Ueber indigoide Farbstoffe in der Verwendung als Oelfarben. Chem. Ztg. 1909, 229). Diese Erscheinung zeigen nicht alle indigoiden Farbstoffe im gleichen Grade. Einige wie Thioindigoscharlach R und Cibafarben sind weitgehend ölbeständig. Es ergaben sich indessen Anhaltspunkte zur Annahme, daß bei anderen Teerfarbstoffen ähnliche Ursachen des beobachteten relativ raschen Verbleichens der Oelfarbenaufstriche im Lichte vorhanden sind.

6b) Eindicken der Oelfarben. Dieses ist zumeist durch die Bildung unlöslicher Seifen aus Bestandteilen der Farbstoffe mit dem Bindemittel verursacht und tritt sowohl bei Anstrich- als bei Tubenölfarben auf. Bei ersteren ist die Ursache die Bildung von Harzseifen (abietinsauren Salzen), wenn Kolophon als Oelbindemittel verwendet wurde. Zur Vermeidung derselben wurde die erwähnte Veränderung des Kolophons durch Herstellung von Harzkalk usw. und Harzestern vorgenommen. Außerdem kann das Eindicken auch durch Ausfallen (Ausfladen) des Harzanteiles aus dem Bindemittel stattfinden, der den Farbstoff mitreißt und mit ihm zu einer festen Paste verkittet. Derartige Erscheinungen kommen auch bei Tubenölfarben vor, sind indessen hier meist durch den Farbstoff verursacht. So dickt Mennige relativ rasch durch Pflasterbildung ein.

7. Einteilung der Farben nach Art der Bindemittel. 7a) Kalkfarben. Als Bindemittel dient hier der gelöschte Kalk bezw. das gelöste Kalkhydrat. Diese Farben werden zum Gebrauche frisch hergestellt. Als Farbstoffe kommen nur kalk- und luftechte in Betracht, also ausschließlich Erd- und Mineralfarben ohne Bleiweiß, Zinkweiß, Chromgelb, Cadmium zitron, Zinkgelb, Chromgrüne, Zinkgrüne und Pariserblaue. Ultramarin ist in Städten bedingt kalkecht. Der Kalk muß möglichst fett, d. h. frei von Magnesia und Silikaten sein. Das Einsumpfen — Ablöschen in Gruben mit durchlässigem Boden — erfolgt zur Trennung des Kalkes von von diesen und den sandigen Bestandteilen, sowie zur Entfernung von löslichen Salzen (Gips usw.). Zu langes Einsumpfen führt den Kalk oberflächlich in Carbonat über und ist daher nicht empfehlenswert. Die Wirkung des Bindemittels ist hier eine zweifache. Verkittung der Farbpartikeln durch den eintrocknenden Kalk und Festigung der Anstrichschicht durch Bildung von Kalksinter — kristallinisch kohlensaurem Kalk — aus dem an die Oberfläche der Malschicht dringenden gelösten Kalkhydrat. Die Zerstörung von Kalkfarbenanstrichen und Freskomalereien wird durch das sich darauf kondensierende kohlensäurehaltige Wasser der Atmosphäre eingeleitet. Es bildet sich zunächst wasserlöslicher saurer kohlensaurer Kalk, der teilweise abtropft, teilweise von den darunter liegenden trockenen Schichten aufgesaugt wird und so zur Verringerung der Bindemittelmenge der Malschicht Anlaß gibt. Verwandelt sich der in dieser verbliebene saure kohlensaure Kalk wieder in neutral kohlensauren, so geschieht dies mit größerer Geschwindigkeit als bei der Bildung des ursprünglichen Sinters. Die Abscheidung erfolgt daher nicht mehr in der früheren kristallinischen, sondern in pulveriger, zur Bindung der Farbenpartikel weniger geeigneter Form. Durch diese Vorgänge wird der Farbschicht die Bindung entzogen. Sie blättert ab oder zerfällt pulverig, je nachdem der eine oder der andere Vorgang überwiegt. Durch Eindringen von Nässe durch die Bewurfschicht (Einregenstellen) wird meist das Abblättern verursacht. Die durch diese bewirkte Zerstörung von Fresken ist nicht an allen Bildstellen die gleiche. Die verschiedenen Farbstoffe begünstigen oder verzögern die Diffusion des Kalkhydrates an die Bildoberfläche. Hierdurch kommt es zu ungleichmäßig dicker Ablagerung von Sinter. Die dunklen Farbstoffe, auch Ocker, verzögern, die hellen bis weißen begünstigen sie, da hier der Kalk überwiegt. Daher werden erstere Stellen

Digitized by Google

an Fresken rascher zerstört als letztere. Teilweise in gemischter Manier, d. h. unter Anwendung von Kaseinfarben usw. ausgeführte Fresken zeigen andere Erhaltungszustände als reine Fresken. Wenn hier auf dem frischen Grund gemalt wurde, sind diese Stellen durch Bildung von Kaseinkalk widerstandsfähiger als die Stellen mit Kalksinter. In Städten bewirkt die schweflige Säure der Rauchgase rasche Zerstörung von Kalkmalereien durch Gipsbildung, da derselbe ebenfalls von Wasser gelöst wird. Die bei Fresken häufige Schleierbildung wird teils durch Auswitterung aus feuchter Bewurfschicht (Mauersalpeter), teils durch Umbildung von saurem kohlensaurem Kalk in neutralen bewirkt.

7b) Wasserglasfarben (Stereochromie, Mineralmalerei). Der Versuch, ein wetterbeständigeres Bindemittel für Monumentalmalerei zu schaffen als der Kalksinter der Kalkfarbentechnik ist, führte zur Erfindung der Wasserglasfarben durch N. von Fuchs, deren technische Ausbildung man Liebig, Pettenkofer, den Malern Kaulbach, Echter, Schlotthauer, sowie dem Techniker Keim verdankt. Die Anwendung geschieht jetzt im wesentlichen nach zwei Verfahren: a) indem man auf einen nach besonderer Vorschrift hergestellten kalkhaltigen Malgrund mit Wasser und Farbstoffen, die Zuschläge von Zinkweiß, Magnesia, Kieselsäurehydrat usw. enthalten, malt und das Bild nach dem Trocknen durch Bestäuben mit Kaliwasserglaslösung fixiert. Hierbei verbindet sich diese mit den Zuschlägen der Farbstoffe und dem Kalk des Malgrundes zu unlöslichen Silikaten, welche Farbschicht und Malgrund mit einander verkitten. b) indem man die Farben mit Wasserglas angemacht auf den in einfacherer Weise hergestellten Malgrund aufträgt. Letzteres Verfahren dient zur Herstellung von Fassadenanstrichen und dekorativen Arbeiten, sowie zur Restaurierung von Fresken (Freskolithverfahren) Das Silexwasserglasverfahren von Eberhardt beruht auf der Herstellung des Wasserglases in einer Form, welche die vorzeitige Abscheidung der Kieselsäure verhindert. Mineralmalereien sind bei richtiger Herstellung naturgemäß wetterbeständiger als Freskomalereien.

7c) Aquarellfarben. Die Anwendung dieser Farben knüpft sich an die Erfindung des Papyros und der Hieroglyphenschrift in Aegypten, wie die älteste Papier- und Tuschefabrikation der Chinesen; im Mittelalter setzte sie sich als Miniaturmalerei und Gouache fort und erreichte in England am Ausgange des 18. Jahrhunderts einen Höhepunkt, auf dem sie sich bis in die moderne Zeit erhielt. Die Aquarellfarben sind das erste Farbenmaterial, das, besonders in England, naturwissenschaftliche Behandlung zunächst bezüglich Lichtechtheit fand. Die Aquarellfarben sind durch zwei Momente besonders gekennzeichnet: Die außerordentlich feine Mahlung der Farbstoffe und das komplizierte Bindemittelgemenge. Erstere ist bedingt durch die in der Aquarellmalerei angewendeten relativ sehr dünnen Farbschichten, die eine Forderung der optischen Methode darstellen, nach welcher die typische und ältere Aquarellmalerei arbeitet, der subtraktiven Farbenmischung durch übereinandergesetzte transparente Farblagen. Die Farbstoffkörner der modernen Aquarellfarben sind durchgängig kleiner als Milzbrandbazillen (0,004—0,01 mm) die durchschnittliche Größe beträgt 0,00025 mm (Maltechnische Mitteilungen der Firma Schmincke & Co. 7. Lieferung). Die ursprüngliche Ueberlegenheit der französischen und englischen Aquarellfarben über die deutschen beruhte u. a. in der feineren Mahlung und in der Zusammensetzung des Bindemittels. Durch diese feine Verteilung der Farbstoffe sowie geeignete Wahl der Bindestoffe wird das Zusammentreten der Farbpartikeln zu größeren Komplexen (Ausflocken) verhindert und die Aufschlämmung derselben in der angeriebenen Aquarellfarbe in einen Zustand versetzt, der jenem von kolloidalen Lösungen angenähert ist. Hierdurch wird glatter Auftrag auf dem als Malgrund dienenden Papier erzielt. Bedingung ist, daß dieses nicht Stoffe wie Alaun usw. enthält, die das Ausflocken befördern (Church, The Chemistry of Paints and Paintings, London 1901). Das Hauptbindemittelmaterial für Aquarellfarben ist weißes arabisches Gummi; außerdem kommen folgende Materialien in Verwendung: weißes Dextrin, Kirschgummi, Tragant, Kartoffelsirup, Kandiszucker, Glycerin, Emulsionen aus Copaivabalsam, Wachs und Mastix mit arabischem Gummi. Diese Mittel haben teils den Zweck, die Sprödigkeit des letzteren zu vermindern, teils die für Herstellung der sogenannten Tuschfarben (Stückfarben) nötige Konsistenz, teils das Feuchtbleiben der Tubenaquarell-, Honig- und Napffarben zu bewirken, teils wie die genannten Emulsionen Glanz des Farbenauftrages und Haftfestigkeit zu erzielen. Um den infolge der kapillaren Attraktion des Wassers besonders auf fetthaltigem und glattem Papier (Bemalen von Photographien) auftretenden unglatten Auftrag der Aquarellfarben zu beseitigen, werden den Aquarellfarben Stoffe zugesetzt, welche der Tropfenbildung entgegenwirken. Als ein solcher ist seit langem die Ochsengalle bekannt und in Verwendung, welche ihre geringe Oberflächenspannung dem Gehalt an Taurocholsäure und deren Seifen und Taurin verdankt (Horadams Patentaquarellfarben). Außerdem werden Gemische von Dichlorhydrin, ölsaurem Natron und einem Präparat aus Schweinegalle verwendet. Zu gleichem Zwecke

Digitized by Google

benützt die Firma Schmincke & Co. neuerdings Salze der Lysalbin- und Protalbinsäure, aus Eiweiß gewonnen. Die Aquarellfarben werden in Stücken (Tuschfarben), Scheiben, Tuben und als Napffarben geliefert (vgl. Buchwald, Aquarellfarben. Chem. Techn. Bibl. Nr. 275). Unter den Farbstoffen für Aquarellfarben befinden sich immer noch solche wie Gummigutt, Gelblacke, Stil de grains, Carmin usw., welche den modernen Anforderungen an die Lichtechtheit von Künstlerfarben nicht entsprechen. Die Anwendung zu großer Mengen von Glycerin ist schädlich, da hierdurch infolge der hygroskopischen Wirkung die Lichtechtheit der empfindlicheren Farbstoffe vermindert wird. Die Gouachefarben weisen größere Gehalte an Bindemittel auf als die Aquarellfarben, da in der Gouachemalerei dickerer Farbenauftrag stattfindet. Sie ist im wesentlichen Deckfarbenmalerei.

7d) Chinesische Tusche. Ihre Fabrikation, die schon 2000 Jahre v. Chr. betrieben worden sein soll, blieb bezüglich der Bindemittelbestandteile teilweise Geheimnis. Als Farbstoff dient Rußschwarz, das aus dem Oel der Samen von Dryandra cordata durch Anzünden in Lämpchen gewonnen wird. An Bindemitteln verwendet man: Hausenblase und Hautleim; dazu kommen Abkochungen von Aconitum und Anchusa nebst Kampfer und Moschus; letzterer wegen des Gerbstoffgehaltes zum Gerben der Leimbindemittel und Unlöslichmachen der Tusche nach dem Auftrocknen. Aus dem Ruß und dem Bindemittelgemisch werden Kugeln geformt, die in geschlossenen Porzellantöpfen längere Zeit im Wasserbade erwärmt werden. Dann werden die Kugeln mit schweren Stößeln unter öfterem Erwärmen gedichtet, hierauf die Stäbchen geformt, diese nochmals mit Holzhammern bearbeitet und in Holzformen gepreßt, welche die Firmenzeichen eingeschnitten enthalten. Das Trocknen erfolgt nach dem Einwickeln der Stäbchen in Papier unter Zwischenlagen von Reisasche bei gewöhnlicher Temperatur. Zuletzt werden sie vergoldet und poliert (Buchwald, Chem. Techn. Bibl. Nr. 275). Die moderne europäische Fabrikation fester und flüssiger Tuschen geht wie die chinesische von zwei Hauptmomenten aus: Verwendung von möglichst feinem Rußschwarz und Auswahl von Bindemitteln, die nach dem Trocknen von selbst oder durch Zusätze wasserunlöslich werden.

7e) Leimfarben. Das Bindemittel derselben ist der Knochenleim. Sie dienen zurzeit nur für Stuben- und dekorative Malerei und werden zur Verwendung frisch hergestellt. Die warme Leimlösung wird den mit Wasser angeteigten Farben beigemischt und unmittelbar darauf gestrichen. Zu starker Leimzusatz kann das Abblättern der Farbe nach dem Trocknen verursachen. Dieses erfolgt durch Volumverminderung der Leimschicht an der Oberfläche durch Abgabe des kolloidal aufgenommenen Wassers, wodurch konkave Aufbiegung der Schicht erfolgt. Leimfarbe zerfällt in feuchten Räumen durch Zersetzung des Bindemittels leicht und eignet sich daher u. a. nicht für Kirchenmalerei. Als Ersatzmittel für tierischen Leim dient vielfach mit Alkalien aufgeschlossene Stärke (Sichelleim usw.). Das Hauptbindemittel der Pereiratempera ist Hausenblasenleim neben anderen wasserlöslichen Stoffen. Sie ist also keine Tempera, sondern wesentlich Leimbindemittel.

7f) Kaseinfarben. Die Eigenschaft der Lösungen der Knochenleime zu gelatinieren, führte zur Einführung der flüssigen Leime. Zu diesen zählen auch die Lösungen des Kaseins in Alkalien, Kalkwasser, Ammoniak, Hirschhornsalz, Borax usw. Die Käseleime besitzen sehr beträchtliche Klebekraft und wurden schon im Mittelalter verwendet. Die Notiz des Plinius des Aelteren, daß der Mörtel für das Tektorium des Minervatempels zu Elis mit Milch angerührt wurde, ist das älteste Zeugnis der Verwendung des Kaseins im Baugewerbe. Im Luccamanuskript (9. Jahrhundert) und bei Cennino 1437 wird es als Farbenbindemittel erwähnt. Für Wandmalerei wird die Kaseinfarbe zum jeweiligen Gebrauch frisch hergestellt, indem das frische Kasein der Milch mit gelöschtem Kalk zusammengerührt den in Wasser aufgeschlämmten Farben zugesetzt wird. Es wird auf frischen Kalkputz gemalt, oder es werden fabrikatorisch hergestellte Kaseinfarben (Gerhardtsche, Richardsche Kaseinfarben) verwendet. Für Anstrichtechnik finden seit einiger Zeit trockene Kaseinpräparate (Kaltwasserfarben) viel Absatz. Diese sind trockene Gemenge von pulverförmigem Kasein mit gelöschtem Kalk und Zuschlägen von die Streichbarkeit und Deckfähigkeit bewirkenden Stoffen wie Kreide, Kaolin usw. Beim Anmachen mit warmem oder kaltem Wasser tritt die chemische Verbindung zu Kaseinkalk und damit die Klebewirkung ein. Durch Zusatz der in Wasser aufgeschlämmten Farbstoffe erhält man streichfertige bunte Kaseinfarben, die auf Mauer, Kalkputz, Holz und Leinwand verwendet werden. Der Kaseinkalk ist nach dem Eintrocknen in Wasser unlöslich; daher sind diese Farbenanstriche abwaschbar. Kaseinfarben streichen sich sehr leicht und haften auch auf Oelgrund. Es kommt indessen wesentlich auf das richtige Mengenverhältnis zwischen Bindemittel und den Farbstoffen an. Enthalten sie von ersterem zu wenig, so haften sie nach dem Trocknen nicht genügend (Wischen). Ist zu viel ver-

Digitized by Google

wendet, so tritt besonders bei dickem Auftrag Abblättern ein. Ein neues Kaseinfarbenbindemittel ist Mahlers Nafkakasein, ein nicht alkalisch reagierendes Präparat von aufgeschlossenem Kasein, das eine bemerkenswerte Klebewirkung, Streichfähigkeit und Beständigkeit besitzt. Die durch Alkali gelösten Kaseinpräparate sind dem Faulen sehr stark ausgesetzt und müssen durch Zusatz konservierender Mittel haltbar gemacht werden. Hierher gehört auch die „Marmorkalkfarbe". Ueber Kaseinsilikatfarben und Kaseinmalerei vgl. R. Scherer, Das Kasein, Wien 1905.

7g) Temperafarben. Hierunter versteht man Künstler- und Anstrichfarben, deren wässeriges Bindemittel einen öligen Bestandteil enthält, die also Emulsionen sind. Temperafarben sind also nicht Farben, deren Bindemittel erst beim Trocknen in Wasser unlöslich wird, wie manchmal angenommen wird. Sie entstanden aus dem Bestreben, Wasser als Malmittel zu verwenden und doch den Vorteil der Unlöslichkeit des einen Bindemittelbestandteiles — des Oeles — zu haben. Es gibt natürliche und künstliche Emulsionen. Die älteste in der Malerei verwendete natürliche Emulsion ist 1. das Eigelb, dessen Anwendung als Farbenbindemittel schon von Plinius den Aelteren bezeugt ist und das im Mittelalter und bis zur Erfindung der van Eyck das Bindemittel für Tafelmalerei war. Es besteht wesentlich aus Wasser, dem Eieröl nebst Eiweiß und dem emulgierenden Agens Vitellin, einem Nucleoalbumin. Seine Emulsionsfähigkeit ist so groß, daß dem Eigelb noch das gleiche Gewicht an fetten Oelen einverleibt werden kann. Hierdurch entsteht 2. die moderne Eiöltempera. Andere künstliche Temperaarten sind 3. die Oelgummitempera. Sie ist der Apothekeremulsion nachgebildet und eignet sich für Tafelmalerei weniger als Ei- und Eiöltempera, da sie einen beim Auftrocknen spröden Bestandteil, das arabische Gummi enthält. Außerdem adhäriert sie wegen starker Oberflächenspannung nicht hinreichend auf Oelgrund, d. h. sie zeigt darauf die Erscheinung des Perlens. Hierher gehören die für Anstrichzwecke verwendeten Oelemulsionen Grundin von Köhler und Mahlers Fondin, bei welchen das emulgierende Agens und gleichzeitige Füllmaterial aufgeschlossene Kartoffelstärke ist. Sie besitzen außerordentliche Geschmeidigkeit und haften auf Oelgrund gut. 4. Kaseinöltempera. Hier bewirkt Kaseinlösung die Emulgierung, die von besonderer Beständigkeit ist. Diese Tempera trägt sich gut auf Oelgrund auf und wird für Künstlerzwecke verwendet (E. Friedlein, Tempera und Temperatechnik, München 1906). Hierher gehört die Nafkakaseinöltempera von Mahler, ein für Anstrich- und dekorative Malerei sehr verwendbares äußerst geschmeidiges Farbenbindemittel. 5. Seifentempera. Sie enthält Wachs- oder Fettseifen als emulgierende Stoffe. Die frühmittelalterliche Wachstempera ist im wesentlichen eine Emulsion von flüssigem Wachs in Wasser, bewirkt durch Vorhandensein von Seifen der freien Wachssäure (Zerotinsäure). Sie wird u. a. hergestellt durch Zusatz von Pottasche zu auf Wasser geschmolzenem Wachs, oder durch teilweise Verseifung mit Aetzalkalien. Diese Emulsionen gehören zu den haltbarsten, die es gibt. Sie wurden schon im frühesten Mittelalter verwendet und bildeten mit oder ohne Oelzusatz das Bindemittel der byzantinischen Wachsmalerei (sogenanntes Punisches Wachs). Die moderne typische Seifentempera enthält als ölemulgierende Stoffe Fettseifen (Venezianerseife). Die Unkenntnis der zur Herstellung einer Emulsion benötigten bezw. überflüssigen Stoffe hat im Laufe der Zeit zur Herstellung einer großen Anzahl von Temperabindemitteln geführt, die zu viele und teilweise schädliche, in ihren Wirkungen sich störende, oder Farbstoffen schadende Ingredienzien enthalten, wie ätzende Alkalien. Zur Konservierung der Eitempera wurde im Mittelalter Feigenmilch, d. h. der Milchsaft der jungen Feigentriebe, der selbst eine Emulsion ist, und Essig verwendet. Heutzutage dienen zur Konservierung der Temperatubenfarben Phenol, Salizylsäure, Resorcin, α-Naphtol usw.

7h) Oelfarben (Lackfarben). Die Oelfarbe besitzt neben der Harzfarbe die größte Transparenz, da die Differenz zwischen den Brechungskoeffizienten von Farbstoff und Bindemittel hier und dort kleiner ist als bei den übrigen Farben. Man unterscheidet Anstrichölfarben, Oeldruckfarben und Künstlerölfarben. Die Oelfarbentechnik im handwerklichen Sinne kam lange vor der künstlerischen Oelmalerei in Anwendung. Nach Gerh. Cremer ist sie eine antike Erfindung. Die Schedula des Theophilus (9. Jahrhundert) erwähnt ihrer zum Anstrich von Holz und Stein. Im frühen Mittelalter wurden Banner- und Schildmalereien in Oelfarben ausgeführt. Diese waren also lange bekannt ehe die Brüder van Eyck im Jahre 1411 ihre Neuerung in der künstlerischen Oelmalerei einführten. Als Bindemittel für Anstrichöl- und Druckfarben dient nur das Leinöl bezw. Leinölfirnis. Sie werden im Gegensatz zu den Künstlerölfarben nicht in butterartiger Konsistenz geliefert, sondern in streichfertigem Zustand, d. h. mit Terpentinöl oder dessen Ersatzmitteln verdünnt. Lackfarben oder Emailfarben sind Farben für Anstrich, welche mit Hochglanz auftrocknen. Sie enthalten als Bindemittel

Digitized by Google

wesentlich Oellacke (Bernstein-, Kopallack) oder eingedicktes Leinöl (Standöl), Holzöllacke, oder feine Copallacke. Derartige Farben sind die Zonkafarbe, Ripolinfarbe, Japanlackfarbe u. a. Sie dicken nicht ein und liefern auch mit Zinkweiß wetterbeständige Anstriche.

7i) Oeldruckfarben; Buch- und Buntdruckfarben. Diese unterscheiden sich von den Anstrichfarben sowohl durch teilweise Verschiedenheit der verwendeten Farbstoffe, als durch andere Zusammensetzung bezw. Konsistenz der Bindemittel. Nach ersterer Hinsicht kommen nur die Buntdruckfarben in Betracht. Die moderne photomechanische Farbendrucktechnik (Drei- und Vierfarbendruck) arbeitet in ähnlicher Weise wie die typische Aquarellmalerei hauptsächlich nach dem Prinzipe der optischen Farbenmischung durch Subtraktion, d. h. wo nicht Rastermischung (additive Farbenmischung) angewendet wird, unter Aufeinanderlagerung transparenter Farbschichten. Sie vermag daher Deckfarben und Farbstoffe, die ein breitbandiges Absorptionsspektrum geben, also chromatisch nicht eintönige, nicht zu verwenden. So geben Ultramarin und Zinnober keinen violetten, sondern bräunlichen subtraktiven Mischton. Zur Erzielung des chromatisch richtigen subtraktiven Dreifarbensystems war man daher genötigt, Farbstoffe mit schmalbandigen Spektren, also Teerfarbstoffe, zu verwenden, die außerdem leicht in der erforderlichen Transparenz herstellbar sind. Die Einführung dieser hat also gerade in diesem Teil der Pigmentfarbentechnik Berechtigung. Die Anforderung bezüglich Lichtechtheit tritt hier in zweite Linie. Andere in der Anstrichtechnik verwendete Farbstoffe sind hier unverwendbar, weil sie entweder durch die Bindemittel nicht genügend gebunden werden oder die Druckwalzen angreifen, wie Zinnober. Die Bindemittel für Farbendruck sind von jenen der Anstreicherei und Lackiererei teils dadurch verschieden, daß für billige Schwarzdrucke sogenannte Kompositionsfirnisse, d. h. harz-, harzöl- und mineralölhaltige Mischungen mit Leinölfirnis benutzt, für feinen Buch- und Buntdruck zwar Firnisse aus reinem Leinöl, aber in viel dickerer und zäherer Beschaffenheit verwendet werden müssen. Diese sind hauptsächlich stark eingedickte oder geblasene Leinöle (Buchdruckfirnisse). Andererseits werden zur Erreichung raschen Trocknens von Massenartikeln des Druckgewerbes Bindemittel angewendet, die wenig oder kein fettes Oel enthalten (vgl. E. Valenta, Die Rohstoffe der graphischen Druckgewerbe II; Ed. Andés, Oel- und Buchdruckfarben).

7k) Systeme der Künstlerölfarben. Während für Anstrich- und Oeldruckfarben ausschließlich Leinöl und dessen Derivate zur Verwendung kommen, diente als Bindemittel für moderne Künstlerölfarben bis vor kurzem zumeist Mohnöl oder dessen Firnis, da dieses viel heller ist als Leinöl, im Dunkeln nicht gilbt und geeignetere Konsistenz der damit angeriebenen Farben ergibt als ersteres. Nur für langsam trocknende und nicht helle Farben werden Gemische von Leinöl und Mohnöl, bezw. ersteres allein als Firnis, wie für Schwarzpigmente verwendet. Außerdem runzelt das Mohnöl beim Trocknen nicht so stark wie Leinöl. Nach dieser Hinsicht und bezüglich Helligkeit steht das früher für Künstlerfarben benützte Wallnußöl dem Mohnöl näher als Leinöl (E. Täuber, Techn. Mitt. f. Malerei XXVIII, 191 [1912]). Andererseits trocknet das Mohnöl nicht so gut durch wie Leinöl und Nußöl. Außerdem stellte Täuber fest, daß das Reißen und Springen der Farblagen bei Anwendung von Leinöl weniger häufig auftritt als bei Mohnölfarben. Er empfiehlt aus den angeführten Gründen die Wiederverwendung von Nußöl in der Künstlerfarbenfabrikation.

Nachdem seit dem Ausgange des Mittelalters die Herstellung dieser Farben fabrikatorisch betrieben zu werden begann, trat zu den Anforderungen bezüglich Malfähigkeit und Haltbarkeit der Bilder die der Lagerfähigkeit der Oelfarben. Um das Eintrocknen zu verhindern, wurden an Stelle der zur Einfüllung dienenden Darmblasen die luftdichteren Zinntuben eingeführt. Teils um das Oelen der Farben zu verhindern, teils um die gewünschte Konsistenz zu erzielen wurden die Künstlerölfarben in butterartiger Beschaffenheit geliefert, so daß sie sich in Strangform aus den Tuben drücken lassen. Da diese Konsistenz nicht bei allen Farbstoffen leicht zu erzielen war und bei den schweren Pigmenten das Absetzen eintrat, griff man zum Wachs als Verdickungsmittel. Zur Anwendung desselben gelangte man im ersten Drittel des vorigen Jahrhunderts auch durch die richtige Anschauung, daß Ueberschuß von Oel zur rascheren Veränderung der Oelbilder führt und infolge der an den antiken Enkaustiken beobachteten Unveränderlichkeit des Wachses, die den Maler Fernbach zur Erfindung einer modernen Wachsmalerei (Fernbachs Enkaustik) führte, deren Ausläufer in der Wachsmalerei für dekorative Zwecke zu finden sind. Später wurde in den Künstlerölfarben das Wachs teilweise durch Harze ersetzt. In den letzten Jahren griff man auf die Darstellung der wachs- und harzlosen Oelfarben des Mittelalters zurück und versuchte reine Harzfarben herzustellen. Man unterscheidet demnach vier Systeme der Fabrikation von Künstlerölfarben: 1. Wachsölfarben, 2. Harzölfarben, 3. reine Oelfarben,

Digitized by Google

4. Harzfarben. 1. Die Wachsölfarbe besitzt den Vorteil, einen Teil des fetten Oeles durch ein Mittel zu ersetzen, das nicht nachgilbt und sich durch Altern nicht verändert. Dieser Zusatz vermindert auch die erwähnte Neigung der Oelfarbe, im dicken Auftrag beim Trocknen zu runzeln. Dagegen verzögert er das Trocknen der Farbe sehr wesentlich, da dadurch der Zutritt des Sauerstoffes der Luft behindert wird. Da, wie erwähnt, die einzelnen Pigmente die natürliche Trockenfähigkeit der fetten Oele im positiven und negativen Sinne beeinflussen, bewirkt Wachszusatz, indem er das Trocknen verlangsamt, keinen Ausgleich der Trockenzeiten der einzelnen Oelfarben, sondern Erhöhung ihrer Verschiedenheit. Diese ist demnach ein Charakteristikum der Wachsölfarben. Die Unterschiede schwanken zwischen 2 und 8 Tagen. Ein Problem der Künstlerölfarbenfabrikation war demnach möglichste Abgleichung der Trockenzeiten der einzelnen Farben. Obwohl das Wachs den Brechungsindex 1,53 hat, erhöht es die Transparenz der Farben nicht, da es ein trübes Medium ist. Die Wachsölfarben sind daher relativ stumpf und haben Neigung zum Einschlagen beim Trocknen, weil saugender Untergrund das Oel stärker anzieht als das Wachs. 2. Die Fabrikation der Harzölfarben und ätherischen Harzölfarben entsprang ebenfalls dem Bestreben, das Zuviel an fettem Oel zu ersetzen. Der Maler Mussini wendete zu diesem Zwecke zuerst Bernsteinfirnis an. Die Firma Schmincke & Co. bildete dieses System aus. Die heutigen Mussinifarben enthalten neben Bernsteinfirnis Copaivabalsam (Marakaibo) und Terpentinöl. Der optische Vorteil dieser Medien besteht in ihrem höheren Lichtbrechungsvermögen (Bernstein 1,53, Copaivabalsam 1,52) gegenüber dem der fetten Oele (ca. 1,48). Hierdurch gewinnen diese Farben an Transparenz. Ferner trocknen sie auch in dickerer Schicht fast ohne Runzeln auf, da hier das Trocknen infolge Verdunstung des Terpentinöls mehr aus der Tiefe erfolgt wie bei den fetten Oelen. Dieselbe Erscheinung bewirken der Copaivabalsam und die Copaivaöle. Außerdem schützt der Harzbestandteil dieser Farben infolge des gasdichteren Zustandes seiner eingetrockneten Schicht die empfindlichen Farbstoffe gegen Lichtwirkung (vgl. Oelunechtheit der indigoiden Farbstoffe). Endlich ist bei Harzölfarben infolge des relativ rascheren Trocknens das Einschlagen nicht so beträchtlich als bei Wachsölfarben. 3. Reine Oelfarben. Die Nachteile zu reichlichen Wachszusatzes bei Künstlerölfarben haben in neuester Zeit noch eine andere Art von Abhilfe veranlaßt. Da, wie erwähnt, die Maler des Mittelalters die Farben nur mit Leinöl, Mohnöl oder Nußöl oder deren Firnissen anrieben und der Erhaltungszustand der meisten damit gemalten Bilder ein guter ist, suchte man diese Art der Herstellung auszubauen. Anfangs schien der angenommene, sehr verschiedene Einfluß der Pigmente auf die Trockenzeiten der Oelfarben der Durchführung ein Hindernis zu sein. Es zeigte sich aber, daß er nicht im vorausgesetzten Grade vorhanden ist und daß die bei den früheren Künstlerölfarben beobachteten Verschiedenheiten der Trockenzeiten hauptsächlich durch den Wachszusatz verursacht sind. Die neuen reinen Künstlerölfarben zeigen Trockenzeiten von 1½ bis höchstens 4 Tagen (A. Eibner, Malmaterialienkunde S. 411). Der Nachteil des Oeles konnte durch Beschränkung der Menge ausgeglichen werden. Hierdurch erreichte man leicht die übliche Konsistenz. Diese Farben sind, da weitere Zusätze wegfallen, reicher an Farbstoff als die alten und daher ausgiebiger. Die Lagerfähigkeit ist, soweit bis jetzt zu urteilen, eine gute. Das Absetzen der schwereren Pigmente wird durch geringfügige Zusätze von Emulsionen oder durch Dicköl verhütet. Das Einschlagen findet hier weit weniger statt als bei den Wachsölfarben. Außerdem wirken sie brillanter als diese, weil das trübe Medium Wachs wegfällt. Derartige Farben werden in Deutschland u. a. von den Firmen G. Wagner, Möwes und Schmincke hergestellt (vgl. A. Eibner, Malmaterialienkunde, Kap. 30). 4. Harzfarben. Schon in der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts hatte der Maler Knierim, in der Meinung, die antiken Wandmalereien seien Harzmalereien versucht, Künstlerfarben mit reinem Harzbindemittel herzustellen und verwendete zu diesem Zwecke Copaivabalsam, den später Pettenkofer in sein System der Regenerierung blind gewordener Oelgemälde einführte. Es wurde schon erwähnt, daß das Harzbindemittel wegen des hohen Brechungsindexes von allen Bindemitteln die Farben am lasierendsten erscheinen läßt. Deshalb wurde auch von Malern des Mittelalters viel mit venezianischem Terpentin und anderen Harzzusätzen gearbeitet. In neuerer Zeit wurden die Harzfarben in Wiederaufnahme gebracht (Gundermanns Farben) und wegen des optischen Effektes teilweise mit Vorliebe verwendet. Ihr Bindemittel besitzt jedoch außer einer gewissen Sprödigkeit nach dem Trocknen den Nachteil, in ätherischen Oelen, wie Terpentinöl usw., teilweise auch in Alkohol, löslich zu sein, was bei Oelfarbe nicht der Fall ist, da das Linoxyn in fast allen organischen Lösungsmitteln unlöslich ist. Mit reinen Harzfarben hergestellte Gemälde können also nach dem Blindwerden nicht mittels des Pettenkoferschen Regenerationssystems, das Alkohol und Copaiva-

Digitized by Google

balsam anwendet, wiederhergestellt werden, ohne daß die Bildoberfläche Schaden leidet. Die Harzfarben haben bisher weite Verbreitung nicht gefunden.

7l) Pastellfarben, Farbstifte, Bleistifte. In der Pastellfarbentechnik wird scheinbar ohne Bindemittel gearbeitet. Doch enthalten die Pastellstifte, falls sie nicht mit Gips als Unterlage hergestellt sind, geringe Mengen von Bindemitteln und außerdem wird dieses durch das Fixieren nachträglich aufgebracht. Mit Farbstiften nach Art der heutigen Pastellstifte sollen schon Lionardo und Daniel du Monstier (†1646) gearbeitet haben. Zu hoher Blüte gelangte die Pastellmalerei durch Raphael Mengs, Boucher, die Rosalba Carriera, Quentin Latour u. a. im 18. Jahrhundert. Bei der Herstellung der Pastellstifte kommt kein Farbstoff ohne aufhellendes Weiß zur Verwendung, da das Pastell auf Helligkeit und Duftigkeit gestimmt ist. Man verwendete früher Gips oder Kaolin (Pfeifenerde), jetzt meist Schlemmkreide. Die Mischungen der einzelnen Farbstoffe werden mit Wasser zu steifem Teig angeknetet und mit wenig Tragantschleim als Bindemittel versetzt. Durch Ausrollen oder Pressen formt man Stifte, die bei mäßiger Temperatur getrocknet werden. Die Menge des Bindemittels ist so zu wählen, daß die Farben sich auf dem Malgrunde, grobkörnigem, mit Bimsteinpulver usw. bestrichenem Papier (Pyramidenkornpapier) leicht abreiben. Das Fixieren erfolgt nach Fertigstellung des Bildes durch Bestäuben mit einem Klebestoff, der den charakteristischen optischen Effekt des Pastells möglichst wenig ändert. Es darf also kein Mittel von hohem Brechungsindex sein und muß bei geringer Menge starke Klebewirkung äußern. Ostwald verwendet eine Lösung von Kasein in Borax (über Herstellung von Pastellstiften vgl. Ostwald, Malerbriefe; Buchwald, Chem.-Techn. Bibl. Nr. 275). Der optische Effekt des Pastells ist durch das starke Vorherrschen des diffusen Oberflächenlichtes infolge Zurücktretens des Bindemittels bei feinkörniger Textur der Bildoberfläche bedingt. Er kann in anderen Techniken nicht erreicht werden. Durch Ueberfixieren kann viel von dem Reiz des Pastells verloren gehen. Die Farbenwirkung des Pastells ist ausschließlich Oberflächenwirkung; Lasuren sind nicht erzielbar. Das die Haltbarkeit von Pastellen beeinträchtigende Moment ist nicht die Abstaubbarkeit infolge der geringen Menge von Bindemittel, da diese durch sachgemäßes Fixieren beseitigt wird, sondern die Aufhellung sämtlicher Töne durch Weiß und der infolge der relativ geringen Menge von Bindemittel fast ungehinderte Zutritt des Luftsauerstoffes und von Feuchtigkeit zur Bildoberfläche. Hierdurch können die unter 3g erwähnten Kontaktwirkungen auftreten, die zu rascherer Lichtwirkung auf die Farbstoffe führen als bei Objekten anderer Maltechniken. Es ist also bei Pastellfarben noch mehr als bei Aquarellfarben die Anwendung nur lichtechter Farbstoffe geboten. Trotzdem finden sich gerade hier immer noch anerkannt lichtunechte, wie Karmin, Chromgelbe und ebensolche Teerfarbstoffe in beträchtlicher Menge vor. Zwei moderne Pastellfarbensortimente ergaben bei der Belichtung innerhalb zwei Monaten im Frühjahre folgende Resultate. Von den Farbstoffen der einen waren 40% verblaßt, 10% nachgedunkelt, 50% unverändert geblieben. Von der anderen waren 31% verblaßt, 48% nachgedunkelt und 21% unverändert geblieben. Es besteht also Veranlassung, für Pastellmalerei lichtechtere Farbstoffe zu wählen. Vor einiger Zeit begann Ostwald die Pastellmanier auf die Monumentalmalerei anzuwenden. Von der Erwägung ausgehend, daß Pastelle keine auf dem Malgrunde haftende zusammenhängende Schicht darstellen, die durch deren Zustandsveränderungen reißen, oder sich ablösen könnte, sondern daß es sich um einen im wesentlichen zusammenhanglosen trockenen Auftrag von Farbkörnern handelt, man daher hier nicht von dem Zustande des Malgrundes abhängig ist und auch beliebig große Flächen mit Farbe bedecken kann, übertrug Ostwald das Pastell auf Wände. Die Fixierung erfolgt mittels Kaseinboraxlösung und nachfolgend mit essigsaurer Tonerde zur Unlöslichmachung des Kaseins. Nach dem Trocknen wird das Bild mit Paraffin eingerieben (W. Ostwald, Monumentales und dekoratives Pastell. Leipzig 1912).

Rafaellistifte. Vor mehreren Jahren stellte der Pariser Maler Rafaelli Oelfarbenstifte her, womit infolge der relativ geringen Menge und besonderen Art des Bindemittelgemisches nach Art der Pastelltechnik gemalt werden kann. Zuletzt wird das Bild gefirnißt. Diese Stifte enthalten als Bindemittel Leinöl, Wachs und Talg. Der Gehalt an letzterem bewirkt, daß mehrere Jahre alte Aufträge dieser Farben mit Terpentinöl, Alkohol oder Aether abgewaschen werden können. Die Zusammensetzung dieses Bindemittels gefährdet also die Bilder beim Regenerieren. Außerdem kann der Talg nicht als geeignetes Farbenbindemittel bezeichnet werden.

Farbstifte. Kreide- und Farbenstifte waren schon im Altertum bekannt. Man unterscheidet Buntstifte, Kohlen- oder Schwarzkreidestifte, Tinten- und Kopierstifte. Das Bindemittel für erstere besteht aus einer Lösung von Gummilack in Weingeist und venezianischem Terpentin. Den Farbstoffen wird Ton zugesetzt. Der geknetete Farbteig wird in einer Presse in Strangform gebracht, diese

Digitized by Google

in Stifte zerschnitten, die zum Zwecke der Erhärtung in luftdicht verschlossenen Blechbüchsen erhitzt werden. Die Fassung in Holz geschieht in der in der Bleistiftfabrikation üblichen Weise. Die Schwarzkreiden werden aus Kienruß hergestellt, der in Leinwandsäcken unter Druck zwischen Preßplatten und gleichzeitigem Erhitzen verdichtet wird, bis die Masse graphitähnliche Beschaffenheit zeigt und in Stifte zerschnitten werden kann. Die lithographischen Kreiden werden nach dem englischen Verfahren aus einem Gemenge von 30 Teilen Bienenwachs, 25 Teilen Talg, 20 Teilen weißer Seife, 15 Teilen Schellack und 6 Teilen Lampenruß hergestellt, das man zum Schmelzen erhitzt und nach dem Erkalten in Stifte formt. Das Bindemittel der Fettstifte besteht aus Talg und Bienenwachs. Zur Herstellung der Tintenstifte dienen wasserlösliche Teerfarben, meist Methylviolett. Als Füllstoff dient Kaolin; als Bindemittel Tragant. Die Farbmasse wird vor der Pressung in Stangenform durch Anwendung hohen Druckes komprimiert und die Stifte dann in Holz gefaßt.

Bleistifte. Stifte aus Blei und Silber zum Schreiben und Zeichnen waren schon im 13. Jahrhundert bekannt. Der Graphit kam als Schreibmaterial erst im 17. Jahrhundert in England in Anwendung. Im 18. Jahrhundert begann die Fabrikation der Graphitstifte in Nürnberg, die den Passauer Graphit verwendete. Mit der Entdeckung der sibirischen Graphitlager im Jahre 1842 nahm die Bleistiftfabrikation außerordentlichen Aufschwung, während die Anwendung der aus Blei oder Bleilegierungen, besonders der Roseschen Mischung, bestehenden Schreibstifte bald aufhörte. Anfangs wurden die Graphitstifte aus dem in Stücken vorkommenden Mineral geschnitten und in Holzformen gefaßt, später wurden die Abfälle, sowie der erdige Graphit zur Fabrikation der Bleistifte verwendet. Hierzu war es nötig, das Pulver in Verbindung mit anderen Stoffen zu kompakten Massen zu formen, aus welchen die Stifte geschnitten werden konnten. Erst später wurden sie durch Durchdrücken der noch bildsamen Graphitmasse durch Röhren in einer die Nachbearbeitung unnötig machenden Form hergestellt. Die Schwierigkeit besteht hierbei in der Herstellung einer Masse, die bezüglich Festigkeit und Abfärbevermögen beim Schreiben dem kompakten Graphit möglichst nahe kommt und außerdem verschiedene Grade der Weichheit erreichen läßt. Die anfangs verwendeten Klebestoffe Leim, Hausenblase, Tragant usw. erwiesen sich als ungeeignet. Man ging daher zur Anwendung von Fichtenharz, Schellack und Spießglanz über. Im Jahre 1795 fand Conté das heute noch übliche Bindemittel zur Herstellung der Graphitstifte in dem Ton. Dieser gibt genügende Bindekraft, um die Masse in Formen zu pressen. Die Verdichtung erfolgt durch Brennen. Diese Stifte haben gegenüber den alten, aus dichtem Graphit hergestellten, den Vorteil, daß die Schrift nicht glänzt und daher dunkler erscheint. Zu diesem Zwecke setzt man der Bleistiftmasse auch etwas Lampenruß zu. Haupterfordernis ist äußerst feine Mahlung der Graphitmasse. Sie erfolgt zuerst trocken, dann in Naßmühlen. Das Mengenverhältnis ist $^3/_4$ bis $1^1/_2$ Teil Ton auf 100 Teile Graphit. Der erhaltene Brei wird durch Abpressen auf die erforderliche Konsistenz gebracht; durch Zerschneiden in dünne Platten und Wiedervereinigung von den Blasen und Hohlräumen befreit und die Masse dann durch die Pressen gezogen. Die erhaltenen Stifte werden zugeschnitten, trocknen gelassen und gebrannt. Die Höhe der Temperatur bedingt die Härte der Bleistifte. Das Brennen erfolgt in feuerfesten, luftdicht geschlossenen Kapseln, in welchen die Stifte in Kohlenstaub eingebettet liegen. Das Holz für die besseren Bleistiftsorten ist Zedernholz; für geringere Rotbuchen-, Linden-, Erlen-, Fichten- und Tannenholz. Die Herstellung der Holzformen für die Graphitrinnen und Fertigstellung der Stifte geschieht mittels Spezialmaschinen (Buchwald, Bleistifte usw. Chem.-techn. Bibl. Nr. 275).

Literatur. *Siehe die Zitate in den einzelnen Abschnitten.*

A. Eibner.

Farben der Mineralien.

1. Entstehung der Farben. 2. Durchsichtige, idiochromatische und farblose Mineralien. 3. Undurchsichtige, idiochromatische Mineralien. 4. Allochromatische Mineralien. a) Färbung durch körperlich vorhandene färbende Substanzen. b) Dilut gefärbte Mineralien. α) Färbung durch isomorphe Beimischung. β) Färbung durch nicht isomorphe Beimischung. γ) Mineralfärbung durch Radiumstrahlen. δ) Einfluß von höherer Temperatur auf dilut gefärbte Mineralien. ε) Fluoreszenz. 5. Lichtbrechung und Färbung. 6. Pleochroismus. 7. Benennung der Farben.

1. Entstehung der Farben. Das Licht wird bei seinem Durchgang durch die Körper teilweise absorbiert;[1]) ist die Absorption unmerkbar gering und von der Wellenlänge annähernd unabhängig, so erscheinen diese im weißen Lichte farblos; ist sie für Licht von verschiedener Wellenlänge ungleich, so erscheinen sie farbig, ist die

[1]) Man vergleiche den Artikel „Absorption, Lichtabsorption".

Digitized by Google

Absorption zugleich sehr stark, so erscheinen sie undurchsichtig. Gehört die Farbe zum Wesen der Substanz, so nennt man diese eigenfarbig oder idiochromatisch, im anderen Fall gefärbt oder allochromatisch.

2. Durchsichtige, idiochromatische und farblose Mineralien. Die Farbe dieser Mineralien ist eine Eigenschaft ihres Stoffes derart, daß jedes immer die gleiche Farbe besitzt oder farblos ist, wenn seine Substanz chemisch rein ist. Die farblosen Mineralien können mit den idiochromatischen in eine Gruppe zusammengefaßt werden, weil absolute Farblosigkeit doch nicht vorkommt; man nennt sie bei größter Durchsichtigkeit wasserhell, aber es ist ja bekannt, daß auch Wasser bei großer Tiefe und Reinheit nicht farblos ist. Die Farbe wie die Durchsichtigkeit wird beeinflußt durch die kristallinische Beschaffenheit; in Kristallen ist die Farbe reiner und tiefer, die Durchsichtigkeit vollkommener als in körnigen oder faserigen Aggregaten oder in dem Pulver der Substanz, ihrem „Strich". Durch Variation der Struktur entsteht Variation der Farbe, Malachit ist in den feinfaserigen schaligen Aggregaten dunkel- bis hellgrün, Kupferlasur in Kristallen tiefblau, in erdigen Massen hellblau, Zinnober tief rubinrot bis grell zinnoberrot, Schwefel in Kristallen gelb, als Mehlschwefel nahezu weiß. Auch die Temperatur beeinflußt die Farbe (ohne chemische Aenderung), so wird Schwefel bei tiefer Temperatur nahezu farblos, während geschmolzener Schwefel bei höherer Temperatur braun wird, um bei fallender wieder hellgelb zu werden.

Die Farbe eines kristallisierten Minerals oder überhaupt einer chemischen idiochromatischen Verbindung ist häufig dieselbe wie die seiner verdünnten wässerigen Lösung; in diesem Fall kann man mit W. Ostwald annehmen, daß die Farbe der betreffenden kristallisierten Verbindung die ihrer Metallionen sei, so, daß Kupfervitriol die blaue Farbe den Cupriionen verdanke, daß die gelbe Farbe des Kaliumchromats durch die gelben Chromationen erzeugt werde. In Konsequenz dieser Anschauung wird man in bezug auf die Molekularstruktur der Salze zu der Annahme geführt, daß die Massenteilchen der ineinander gestellten Teilsysteme eines regelmäßigen Punktsystems nicht nur chemische Moleküle, sondern auch Ionen sein können, und daß diese ihre Farbe dem kristallisierten Körper mitteilen. Für den Fall, daß der kristallisierte Körper eine andere Farbe besitzt als seine verdünnte wässerige Lösung, wäre anzunehmen, daß diesem durch die Kristallstruktur eine besondere Farbe zukomme, die kristallisierte Verbindung nicht dissoziiert sei und ihrerseits eine eigene Farbe besitze.

Farblose Mineralien und chemische Verbindungen sind auch in ihren Lösungen farblos; ihre Ionen sind farblos. Blei-, Baryum-, Strontiumsalze sind Beispiele. Kohlenstoffverbindungen jedoch, welche im kristallisierten Zustand Isomere der geschmolzenen oder gelösten Verbindung sind, können in beiden Zuständen verschiedene Farbe besitzen. So sind die Kristalle von Nitrosobenzol farblos oder weiß, die geschmolzene oder in gewissen Lösungsmitteln gelöste Substanz aber ist grün.

Durch Verunreinigung wird die Farbe mehr oder weniger leicht und stark verändert, die des Schwefels wird durch tonige Beimischung braun, die von Zinnober durch Kohlenwasserstoffe schwarz. Durch Verwitterung geht die Farbe in die der Verwitterungsprodukte über, Eisenspat wird rot, wenn er in Eisenoyxd, braun, wenn er in Hydroxyd übergeht, schwarz, wenn er zugleich Mangan enthält, indem dieses in Manganoxyde übergeht. Rotkupfererz wie Kupferlasur werden durch Umwandlung in Malachit grün, Weißbleierz durch Umwandlung in Bleiglanz schwarz. Eigenartig ist der Zerfall des roten Realgars unter dem Einfluß des Lichtes in ein gelbes aus As_2S_3 und As_2O_3 bestehendes Pulver.

Unter dem Einfluß von Strahlungen wird die Farbe idiochromatischer Mineralien nur unwesentlich geändert; farblose Mineralien werden hierdurch bisweilen gefärbt, aber wohl nur, wenn sie nicht vollkommen chemisch rein sind. Es scheint, als ob analytisch nicht mehr nachweisbare Spuren einer Beimischung schon hinreichen, einem farblosen Mineral unter dem Einfluß von Strahlungen eine Färbung zu erteilen.

3. Undurchsichtige idiochromatische Mineralien. Undurchsichtige idiochromatische Mineralien haben metallischen Charakter, d. h. sie besitzen infolge eines starken Reflexionsvermögens Metallglanz. In dünnsten Blättchen lassen viele von ihnen Licht hindurch; so erscheinen äußerst dünne Goldblättchen im durchfallenden Licht blau durchsichtig. Allgemein ist die Farbe eines Metalls im reflektierten Licht annähernd komplementär zu der Farbe des durchfallenden Lichtes; ein Metall, wie Kupfer, erscheint rot, weil das rote Licht stärker als die anderen Farben reflektiert wird. Unter Benutzung von äußerst dünnen Metallprismen ist es Kundt und Drude gelungen, die Brechungsindizes von Gold, Silber, Kupfer und anderen Metallen zu bestimmen, deren Werte ganz auffallend niedrig, für die drei genannten Metalle kleiner als eins sind. Je kleiner der Brechungsindex, um so höher ist der Absorptionskoeffizient, um so stärker der Glanz. Für Silber beträgt das Reflektionsvermögen für Na-Licht 95,3%, woraus sich dessen hoher Glanz erklärt.

Digitized by Google

In Antimonglanz ist nach P. Drude die Absorption etwa viermal kleiner, der Brechungsindex entsprechend sehr hoch, 4,49 und 5,17 je nach der Richtung. Einen Apparat zur Erkennung und Messung optischer Anisotropie metallischer Substanzen hat Joh. Königsberger konstruiert. Die Farbe der metallischen Mineralien wird durch Beimischungen beeinflußt, so die von Gold in bekannter Weise durch beigemischtes Silber oder Kupfer, die von Platin durch Eisen, und sie wird geändert durch chemische Umbildungen der Oberfläche, indem Anlauffarben entstehen. Diese können auf ungleichwertigen Flächen nach Charakter und Intensität verschieden sein, ebenso wie derartige Flächen sich oft durch ihren Glanz unterscheiden.

Kristalle oder dünne Schichten gewisser Verbindungen — Fuchsin, Platincyanüre, Cyanin, Kaliumpermanganat — vereinigen in sich die Eigenschaften durchsichtiger und undurchsichtiger idiochromatischer Körper, indem sie gewisse Lichtarten stark absorbieren und für diese Farben undurchsichtig metallglänzend erscheinen, für andere Lichtarten durchlässig sind. Nach dem Vorgang von Haidinger, der die Erscheinung als Oberflächenschiller bezeichnet hat, werden diese Farben als Oberflächenfarben und Körperfarben unterschieden; beide sind für dieselbe Richtung eines Kristalls annähernd komplementär. Für kristallographisch verschiedene Richtungen können sie verschieden sein, z. B. auf den Prismenflächen der quadratisch kristallisierenden Platincyanüre andere sein als auf deren Basisflächen. Kristalle mit derartigen Oberflächenfarben zeigen zugleich anomale Dispersion.

Durch Interferenz erzeugte Farben. Von den Oberflächenfarben sind die Schillerfarben nach ihrer Ursache scharf zu unterscheiden; sie sind nicht der kristallisierten Substanz als solcher eigentümlich, sondern werden durch äußerst feine, massenhaft in ihnen vorhandene Einschlüsse oder Hohlräume dadurch erzeugt, daß das Licht durch diese zur Interferenz kommt. Wenn diese Einschlüsse zugleich nahezu undurchsichtig sind, wird der größte Teil des Lichtes an ihnen reflektiert und durch Zusammenwirkung dieser Faktoren Farben von nahezu metallischem Charakter erzeugt. Die Einschlüsse sind meistens nach einer Richtung dünn tafelig und nach kristallographisch bestimmten Richtungen innerhalb der Kristalle orientiert, so daß die Schillerfarben nur in gewissen Richtungen auftreten. Der unter dem Namen Labrador bekannte Kalknatronfeldspat liefert hierfür das beste Beispiel (Labradorisieren); auch gewisse Alkalifeldspate zeigen solchen Farbenschiller oder solche Farbenwandlung, während es noch nicht exakt bewiesen ist, ob der blaue Lichtschein der unter dem Namen Mondstein bekannten Varietät des Kalifeldspates auf die gleiche Weise zustande kommt oder ob hier mehreres zusammenwirkt, um den Lichtschein zu erzeugen.

Unabhängig von derartigen Einschlüssen werden lebhafte Farben durch Interferenz des Lichtes an dünnen Luftschichten erzeugt, so häufig an Kristallen, in denen infolge von Spaltbarkeit Lamellen sich abgelöst haben. Schwerspat, Gips, Kalkspat lassen solche Interferenzfarben häufig erkennen; diese Erscheinungen nennt man Irisieren. Unter Umständen können solche Interferenzfarben auch unabhängig von dünnen Luftschichten in farblosen doppelbrechenden Blättchen zu sehen sein, wenn das Licht unter geeignetem Winkel einfällt und reflektiert wird; auf einen Glasstreifen montierte Blättchen und Keile von Gips oder Quarz lassen so im auffallenden Tageslicht die gleichen Farben erkennen, wie in einem Polarisationsinstrument. Durch Interferenz des Lichtes an feinsten Hohlräumen wird wahrscheinlich das lebhafte Farbenspiel des Edelopals erzeugt, durch Beugung des Lichtes an äußerst feinen Fasern entstehen die Farben im Regenbogenachat.

4. Allochromatische Mineralien. 4a) Färbung durch körperlich vorhandene färbende Substanzen. Unter den gefärbten Mineralien sind zunächst diejenigen abzutrennen, welche ihre Farbe körperlich vorhandenen farbigen oder selbst wieder gefärbten Einschlüssen verdanken; diese können in Dünnschliffen unter dem Mikroskop oder als Rückstand bei der Auflösung erkannt werden. So erdiges Eisenoxyd, welches Steinsalz rot, Gips, welcher es grau färbt. Sind die Einschlüsse selbst kristallisiert, so kommt dies in dem Charakter der Farbe des einschließenden Minerals zum Ausdruck; so erscheinen durch eingeschlossenen Eisenglimmer die Mineralien Carnallit, der unter dem Namen Sonnenstein bekannte Oligoklas, der Aventurinquarz, mancher Heulandit metallisch glänzend rot. Auch hier sind die eingeschlossenen Kriställchen oft kristallographisch orientiert und in gewissen Fällen (Carnallit) ist es nach A. Johnsen wahrscheinlich, daß sie sich erst nachträglich in ihrem Wirt gebildet haben, daß ihre Substanz zuvor in diesem in fester Lösung enthalten war. Zu dieser Gruppe gehören u. a. die rhombischen Pyroxene, Bronzit und Hypersthen, die durch dünne tafelförmige Einschlüsse vielleicht von Titaneisen in bestimmten Richtungen einen metallischen Schiller besitzen. Einschlüsse feiner, nach einer Richtung gestreckter Mineralien bewirken, wenn sie annähernd parallel liegen,

Digitized by Google

je nach ihrer Größe außer einer Färbung wechselnde Erscheinungen, den Lichtschein des Katzenauges (durch Asbest) wie den eigenartigen Glanz und die matte Farbe von manchem Elaeolith. Sind diese feinen Einschlüsse nach mehreren Richtungen kristallographisch orientiert, so bewirken sie Beugungserscheinungen, ohne daß ihre Farbe selbst, weil sie zu fein sind, hierbei zur Geltung käme: so den Asterismus in Glimmer, in Sternsaphir, Rosenquarz, Almandin. Die Nädelchen, welche ihn bewirken, gehören meist dem Rutil an. Sind die eingeschlossenen Teilchen dagegen in keiner Weise regelmäßig geordnet, so erteilen sie dem Wirt eine gleichmäßige Farbe, wie Strahlstein der Prasem genannten Varietät von Quarz.

Andere Mineralien, welche von Natur ungefärbt sind, erhalten eine Farbe durch Pigmente, welche in Zwischenräumen sich ablagern; so das Tigerauge. Es ist ursprünglich ein feinfaseriges blaues Mineral, Krokydolith, eine Varietät von Hornblende gewesen; durch Verwitterung ist es in Kieselsäure zerfallen, welche als Quarz die Fasern einnimmt, und Eisenhydroxyd, das zwischen den Fasern sich abgelagert hat. Mineralien von derartiger Struktur gestatten künstliche Färbung: Tigerauge, indem es zunächst durch Behandlung mit Salzsäure entfärbt und danach mit Anilinfarben gefärbt wird; gestreifter, aus porösen und dichten Schichten bestehender Chalcedon, indem die porösen Schichten mit Farbstoff getränkt werden (rot entsteht durch Eisensalz und nachheriges Glühen, schwarz durch Honig oder Zucker und Behandlung mit Schwefelsäure, grün durch Chromsalze usw.). Auch regelmäßige Zeichnungen wie die der natürlichen Baumsteine werden künstlich hervorgerufen, indem die Zeichnung auf mit Wachs überzogenen Chalcedon eingekratzt und mit Höllenstein eingeätzt wird; dieser dringt in den Chalcedon ein, tritt mit schwarzer oder brauner Farbe nach dem Brennen hervor und ahmt täuschend echten Braunstein nach.

4b) Dilut gefärbte Mineralien. Im Gegensatz zu diesen Mineralien, welche durch ein körperlich vorhandenes Pigment gefärbt sind, stehen die dilut gefärbten, deren Farbe oft ebenso gleichmäßig wie die der idiochromatischen Mineralien oder die einer Farbstofflösung, der Verbindung jedoch nicht eigentümlich ist. Oefters jedoch ist die Färbung in ihnen ungleichmäßig, indem ihre Intensität oder die Farbe von Schicht zu Schicht wechselt, so daß die Kristalle zonaren Bau deutlich erkennen lassen (Turmalin, Flußspat, Augit). Auch können die beiden Enden eines Kristalls verschieden (Turmalin, Diopsid) oder die Färbung ganz unregelmäßig fleckig sein (Saphir, Flußspat).

In vielen Fällen beruht die Färbung darauf, daß mit einer farblosen Verbindung eine gefärbte gemischt ist; die Analyse bringt hierfür den Beweis. Die Beimischung kann mit der ersteren isomorph oder nicht isomorph sein.

α) Färbung durch isomorphe Beimischung. Wie Kalialaun durch isomorphe Beimischung von Chromalaun violett in allen Tiefen werden kann je nach der Menge der Beimischung, so werden Magnesiasilikate durch Beimischung isomorpher Eisenoxydulsilikate grün (Olivin-, Pyroxenreihe), durch Eisenoxydsilikate braun wie Kalktongranat durch Kalkeisengranat. Rubin verdankt seine rote Farbe beigemischtem Chromoxyd, während Smaragd durch das im Silikat enthaltene Chrom grün gefärbt ist. Auch mehrere Stoffe können sich an der Färbung beteiligen, wobei es aber nicht immer möglich ist, anzugeben, in welcher Verbindung sie in dem Kristall enthalten sind. Eine solche Rolle spielt neben Eisenverbindungen Titan im Granat, Augit und anderen Silikaten, in dem blauen Saphir und anderen künstlichen Edelsteinen (siehe den Artikel „Schmucksteine"). Die äußerst mannigfaltige Färbung des Turmalins, wechselnd von Kristall zu Kristall wie in demselben Kristall, beruht auf vielfachem Wechsel seiner Zusammensetzung, indem sich Verbindungen, die für sich nicht bekannt sind, isomorph mischen.

β) Färbung durch nicht isomorphe Beimischung. Daß auch durch nicht isomorphe Beimischung Kristalle dilut gefärbt werden können, beweisen die Versuche von O. Lehmann. Kohlenstoffverbindungen, wie Meconsäure und viele andere nehmen beim Kristallisieren aus einer Lösung, die zugleich einen Farbstoff (Modebraun, Methylenblau, Malachitgrün, Methylviolett) gelöst enthält, diesen in sich auf, wobei die Kristalle in der Regel dunkler gefärbt werden als ihre Lösung. In den meisten Fällen werden die Kristalle zugleich stark dichroitisch. Sind die einen Kristall umschließenden Flächen kristallographisch ungleichwertig, so ist auch der Sättigungspunkt der Farbstofflösung in bezug auf den Kristall auf verschiedenen Flächen desselben verschieden, und die Folge hiervon ist, daß die zu ungleichwertigen Flächen gehörenden Anwachspyramiden verschieden gefärbt werden können. Meconsäure durch Methylviolett gefärbt gibt so Kristalle mit verschieden gefärbten Sektoren. Unter den Mineralien ist verschiedene Färbung ungleichwertiger Anwachspyramiden besonders von Augit bekannt, dessen Kristalle im Durchschnitt sogenannte Sanduhrform zeigen. Auch für diese hat Pelikan angenommen, daß die Versichedenheit der Färbung nicht durch

Digitized by Google

isomorphe, sondern durch nicht isomorphe Beimischung erzeugt werde. Derartige homogene Mischungen fremder zu einem Kristall vereinigter Körper sind nach dem Vorgang von van't Hoff als feste Lösungen aufgefaßt worden; nach Johnsens Untersuchungen dürften jedoch meistens mechanische Gemenge oder regelmäßige Verwachsungen, nicht aber physikalische Gemische vorliegen.

Durch nicht isomorphe Beimischung ist der unter dem Namen Amazonenstein bekannte Kalifeldspat grün gefärbt, denn eine mit Feldspat isomorphe grüne Verbindung ist nicht bekannt. Wahrscheinlich wird die Farbe durch eine Kupferverbindung erzeugt.

Eigenartig verhält sich Salmiak, wenn er aus Lösungen, die andere Chloride oder Chlorüre enthalten, kristallisiert; am längsten bekannt und am häufigsten untersucht sind die roten Eisensalmiakkristalle. Ihre Natur ist deswegen schwer zu ermitteln, weil die Salze mehrere Hydrate bilden und entweder als solche in wechselndem Verhältnis sich mit Salmiak mischen oder mit Salmiak Doppelsalze bilden, die dann wieder in wechselndem Verhältnis mit Salmiak Mischkristalle bilden. Zuletzt hat A. Johnsen diese anomalen Mischkristalle einer Untersuchung unterworfen und vieles klar gestellt; er bemerkt aber, daß sich über die chemische Natur der eingelagerten Substanzen doch nur zuweilen etwas aussagen lasse, und daß man von der Natur der Mischkristalle sich erst dann werde ein Bild machen können, wenn die Gleichgewichtsverhältnisse gleicher und ungleicher Kristallmoleküle physikalisch bearbeitet sein werden.

γ) Mineralfärbung und Radiumstrahlen. Während in diesen Fällen die Anwesenheit eines färbenden Stoffes analytisch immer noch nachgewiesen werden kann, ist dies bei sehr vielen anderen prächtig und mannigfaltig gefärbten Mineralien nicht mehr möglich. Hierzu gehören die Farbvarietäten von Bergkristall, Rauchquarz, Rosenquarz und Amethyst, die von Beryll, Aquamarin und Goldberyll, die von Zirkon, das blaue Steinsalz, Flußspat in allen seinen prächtigen Farben, Apatit, der diesem nur wenig nachsteht, Topas, Kunzit, blauer Schwerspat und Coelestin und viele andere. Ungemein zahlreiche, von Doelter gesammelte Untersuchungen beschäftigen sich mit der Frage nach der Ursache dieser Färbungen, ohne eine allgemeine Lösung gefunden zu haben, nur das dürfte sicher sein, daß Strahlungen der verschiedensten Art vor allem Radium-, Thorium- und vielleicht Kaliumstrahlen eine Rolle hierbei spielen, indem sie während der Entstehung der Mineralien wie später auf diese einwirken und ihre Farbe erzeugen oder beeinflussen. Aber auch hierbei ist die Färbung an sich farbloser Verbindungen wohl immer an die Gegenwart fremder, analytisch nicht mehr nachweisbarer, daher vorläufig unbekannter Stoffe gebunden, indem Verbindungen, die wir als chemisch rein glauben ansprechen zu dürfen, wie künstlich hergestelltes Chlornatrium, reinster Bergkristall, von Natur farbloser Zirkon jenen Strahlungen gegenüber indifferent bleiben, während solche, deren chemische Reinheit nicht so hochgradig ist, leichter Färbung annehmen, wie natürliches Steinsalz, durch Glühen entfärbter Rauchquarz oder gar Zirkon. Welcher Art die Stoffe sind, durch deren Gegenwart die Mineralien zur Annahme einer Farbe prädisponiert werden, ist noch nicht ermittelt; die zuletzt besonders durch L. Wöhler vertretene Ansicht, daß es organische Substanzen, Kohlenwasserstoffe seien, wird mehr und mehr verdrängt durch die zuletzt besonders durch Weinschenk vertretene Ansicht, daß es anorganische Stoffe, Eisen-, Mangan-, Titan- und dergleichen Verbindungen seien.

Eine besondere Schwierigkeit bieten Mineralien, welche so große Farbenmannigfaltigkeit zeigen wie Flußspat und Apatit; für letzteren ist es nach Pupkes Untersuchungen wahrscheinlich, daß mehrere Faktoren bei der Färbung beteiligt sind, Beimischung färbender Stoffe (Mangan- und Eisenphosphat) und Einwirkungen radioaktiver Substanzen. Für die Farbenmannigfaltigkeit des Flußspats kann man eine befriedigende Erklärung überhaupt noch nicht geben. Auch die Ursache der blauen Färbung von Steinsalz ist trotz sehr zahlreicher Untersuchungen bis heute nicht bekannt.

Durch die von eingeschlossenen, wenn auch nur schwach radioaktiven Kristallen von Zirkon ausgehenden Strahlungen werden häufig in dem einschließenden Mineral (Cordierit, Biotit) um jene intensiver oder abweichend von der Hauptmasse gefärbte, dazu oft dichroitische Höfe erzeugt; da die Radioaktivität der eingeschlossenen Kristalle nur schwach ist, können sie nur nach sehr langer Einwirkung entstanden sein, woraus sich erklärt, daß sie nur in Mineralien alter Gesteine (Gneis) auftreten. Diese pleo-chroitischen Höfe werden von den α-Strahlen erzeugt, welche die Derivate der Radium- und Thoriumfamilie bei ihren Umwandlungen aussenden (vgl. den Artikel „Radioaktivität").

δ) Einfluß von höherer Temperatur auf die Farbe dilut gefärbter Mineralien. Stärker noch als bei idiochromatischen Mineralien ändert sich bei manchen allochromatischen die Farbe mit der Temperatur; so wird Rubin bei steigender Temperatur schmutzig grün bis farblos, beim Abkühlen wieder so rot wie zuvor. Amethyst wird durch Glühen gelb, mancher Rauch-

Digitized by Google

quarz dunkelweingelb, gelber Topas rosenrot, brauner Zirkon farblos; beim Abkühlen kehrt in diesen Mineralien die Farbe von selbst nicht wieder zurück, wohl aber, wenn sie Radiumstrahlen ausgesetzt werden.

Andere Mineralien verblassen unter dem Einfluß des Sonnenlichtes, so manche Topase, Flußspate, Rosenquarz. Lange bekannt ist dies von dem zart rosa gefärbten Zirkon in Auswürflingen des Laacher Sees; durch Radiumbestrahlung wird auch dieser wieder gefärbt.

Dies alles deutet darauf hin, daß bei der diluten Färbung allochromatischer Mineralien Radium- oder auch Thorium- und andere Strahlen mit wirksam sind.

ε) Fluoreszenz. Manche dilut gefärbte Kristalle, besonders solche von Flußspat, haben mit den Lösungen einiger Stoffe (Fluorescein, schwefelsaures Chinin) die Eigenschaft gemein, daß sie bei Bestrahlung mit gewissen Lichtarten selbstleuchtend werden, Licht von anderer Farbe erzeugen, eine Eigenschaft, die als Fluoreszenz bezeichnet wird. Auch dies beweist, daß in dem Flußspat ein seiner Verbindung fremder Stoff enthalten ist, der seine Farbe wie die Fluoreszenz erzeugt, und man kann allgemein annehmen, daß die färbenden Stoffe in den dilut gefärbten Mineralien der letzten Gruppe in deren Substanz gelöst enthalten seien, daß sie mit diesen eine feste Lösung bilden und weiter, daß manche erst durch Einwirkung radioaktiver Stoffe so zerlegt werden, daß sie die Farbe erzeugen.

5. Lichtbrechung und Färbung. Die Frage, inwieweit die Lichtbrechung der Mineralien etwa durch Pigmente geändert werde, hat E. A. Wülfing durch exakte Messung an Diamant, Flußspat der verschiedensten Färbung, Quarz, Rauchquarz und Amethyst geprüft mit dem Ergebnis, daß die Pigmente keinen nennenswerten Einfluß auf die Lichtbrechung ausüben, während es andererseits durch viele Untersuchungen bekannt ist, daß die Lichtbrechung in Kristallen, welche durch isomorphe Beimischung gefärbt sind, sich sehr merkbar, und zwar proportional mit der Beimischung ändert; Farbe wie Lichtbrechung sind hier additive Eigenschaften.

6. Pleochroismus. Allgemein ist die Farbe eines optisch anisotropen Kristalls von der Richtung abhängig, in der das Licht durch den Kristall hindurchgeht, die Absorption ist in optisch gleichwertigen Richtungen gleich, in ungleichwertigen Richtungen verschieden; sind die Absorptionsunterschiede merkbar groß, so erscheint die Farbe des Kristalls je nach der Richtung verschieden: ein Rubin erscheint in der Richtung der Hauptachse bläulichrot, senkrecht dazu gelblichrot, ein Turmalin in der ersteren Richtung etwa schwarz und undurchsichtig, senkrecht dazu grün, der rhombische Cordierit erscheint in der Richtung der einen Achse dunkelblau, der zweiten hellblau, der dritten gelblichweiß. Diese Erscheinung nennt man Pleochroismus, auch Dichroismus; sie wird, da sie mit der Doppelbrechung in engster Beziehung steht, bei dieser besprochen werden (vgl. den Artikel „Doppelbrechung").

7. Benennung der Farben. Bei der genauen Benennung einer Farbe bestehen Schwierigkeiten, die nicht zu überwinden sind, weil die Farbe immer ein subjektiver Eindruck ist und in unserer Sprache die Worte für die Mannigfaltigkeit der Farben fehlen; wir behelfen uns durch Vergleich mit mehr oder weniger bekannten Dingen. Speisgelb nennen wir Schwefelkies nach einem bei der Verhüttung von Kobalt- und Nickelarsenerzen entstehenden Zwischenprodukt, tombakbraun Magnetkies nach einer kupferreichen Messinglegierung, aber wer hat je eine solche Speise oder Tombak gesehen? Zur Bezeichnung von Rot bei nichtmetallischen Mineralien müssen Blut, Fleisch und Scharlach, Rosen, Hyazinthen und Pfirsichblüten, Ziegel und sogar Morgenrot ihre Namen hergeben.

Um eine exaktere Bezeichnung der Farbe herbeizuführen, hat man Farbenskalen zusammengestellt, von denen die „Internationale Farbenskala von Radde" am meisten in Gebrauch ist. Die Farbe des Minerals wird durch Vergleich mit denen der Skala bestimmt und in bezug auf diese durch Bezeichnungen angegeben, so daß jeder, der die Skala besitzt, hieraus entnehmen kann, welche Farbe gemeint ist. Die Bestimmung läßt sich bei trüben und nicht metallischen Mineralien recht genau durchführen, versagt aber leicht bei klar durchsichtigen oder metallischen Mineralien. Für erstere könnte man sich helfen durch farbige Gläser, für letztere durch Bronzefarben, die beide etwa nach Art der Raddeschen Skala zusammenzustellen wären.

Literatur. **W. Ostwald,** *Ueber die Farbe der Ionen. Zeitschr. f. phys. Chem.* 9, *1892.* — **Derselbe,** *Grundlinien der anorganischen Chemie, 1900.* — **P. Drude,** *Beobachtungen über die Reflexion des Lichtes am Antimonglanz. Ann. d. Phys., N. F., Bd. 34, 1888.* — **Derselbe,** *Lehrbuch der Optik, 1906.* — **Joh. Koenigsberger,** *Ueber einen Apparat zur Erkennung optischer Anisotropie undurchsichtiger Substanzen. Centralbl. f. Min., 1908 und 1909.* — **M. Leo,** *Die Anlauffarben. Dresden 1911.* — **O. Lehmann,** *Ueber künstliche Färbung von Kristallen. Ann. d. Phys. N. F.* 51, *1894.* — **A. Pelikan,** *Ueber den Schichtenbau der Kristalle. Tschermaks Min. u. petrogr. Mitteil., Bd. XVI, 1896.* — **A. Johnsen,** *Die anomalen Mischkristalle. N. Jb. f. Min. 1903, II.* — **C. Doelter,** *Das Radium*

Digitized by Google

und die Farben. Dresden 1910. — **K. Simon,** *Beiträge zur Kenntnis der Mineralfarben. N. Jb. f. Min. Beil., Bd. 26, 1908.* — **F. Pupke,** *Die optischen Anomalien bei Apatit. Dissertation, Bonn 1908.* — **E. A. Wülfing,** *Einiges über Mineralpigmente. Festschrift zum 70. Geburtstag von H. Rosenbusch, 1906.* — **R. Brauns,** *Die Ursachen der Färbung dilut gefärbter Mineralien (mit Angabe der neuen Literatur). Fortschr. d. Min. I. 1911.*

R. Brauns.

Farbstoffe.

1. Einleitung. 2. Chemische Struktur der Farbstoffe. 3. Färbeverfahren. 4. Echtheitseigenschaften. 5. Giftigkeit. 6. Einteilung der Farbstoffe. 7. Darstellungsverfahren und Beschreibung der wichtigsten Farbstoffe. 8. Analytische Erkennung und quantitative Bestimmung von Farbstoffen. 9. Geschichtliches und Statistisches.

1. Einleitung. Verdünnte wässerige Lösungen von Kaliumbichromat, Azobenzolsulfonsäure, Methylorange sind rotgelb gefärbt. Tränkt man weiße Wollfäden mit diesen Lösungen und wäscht sie später mit Wasser aus, so verschwindet die Färbung, welche von Kaliumbichromat und von Azobenzolsulfonsäure herrührt, nicht aber die von Methylorange. Diese Verbindung ist im Gegensatz zu den beiden anderen ein Farbstoff, sie überträgt ihre Färbung auf die eingetauchte Wollfaser; die beiden anderen Verbindungen sind zwar ebenso rotgelb gefärbt wie Methylorange, sie sind farbige Stoffe, aber keine Farbstoffe, da sie eingetauchte Gespinnstfasern nicht anfärben, nicht „auf Gewebe aufziehen", wie man in der Färberei sagt. Als Farbstoff bezeichnet man sonach nicht jede farbige chemische Verbindung, im allgemeinen auch nicht solche farbige Substanzen, welche als Pulver — Ocker, Chromgelb, Ultramarin — durch Bindemittel wie Gummi, Leim, Oel, Firnis, Wachs, Kalk auf einer Unterlage festgeklebt werden, was für Wasserfarben, Oelfarben, Kalkfarben zutrifft, sondern nach dem heute üblichen Sprachgebrauch nur solche farbigen Verbindungen, welche in gelöster Form pflanzliche und tierische Gewebe — Baumwolle, Wolle, Seide, Leder, Horn, Federn — anfärben. Derartige Farbstoffe sind mit wenigen Ausnahmen Kohlenstoffverbindungen und deshalb deckt sich im wesentlichen die Bezeichnung „Farbstoffe" mit dem, was der Chemiker „organische Farbstoffe" nennt.

Die praktisch verwerteten organischen Farbstoffe sind zum kleineren Teil pflanzliche und tierische Erzeugnisse, beispielsweise Lackmus, Karmin (vgl. dazu die Artikel „Pflanzenstoffe unbekannter Konstitution" und „Tierstoffe unbekannter Konstitution"), zum weitaus größeren aber auf rein chemischem Wege gewonnene Verbindungen, künstliche Farbstoffe. Auch die wichtigsten altbekannten Pflanzenfarbstoffe Krapp und Indigo werden heute fabrikmäßig durch chemische Synthese hergestellt; die natürlichen organischen Farbstoffe spielen nur noch eine untergeordnete, täglich an Bedeutung abnehmende Rolle.

Fast ausnahmslos dienen als Ausgangsmaterial zur Darstellung der künstlichen Farbstoffe die aus dem Steinkohlenteer (vgl. den Artikel „Teer") gewonnenen aromatischen Kohlenwasserstoffe Benzol, Toluol, Naphtalin und Anthracen und deshalb führt das Heer der organischen Farbstoffe mit Recht den Sammelnamen „Teerfarbstoffe" oder auch, aber weniger zutreffend, „Anilinfarben".

2. Chemische Struktur der Farbstoffe. Weitaus die Mehrzahl aller Kohlenstoffverbindungen ist farblos; nur einige wenige Körperklassen sind farbig und innerhalb dieser besitzt wiederum nur ein Teil der Abkömmlinge die Eigenschaft zu färben. Wir können uns bestimmte Vorstellungen über den molekularen Bau der meisten Farbstoffe machen und diese Struktur durch Formelbilder veranschaulichen, die in leicht verständlicher Weise mehr besagen als Namen und lange Beschreibungen.

Alle Farbstoffe enthalten mindestens eine Atomgruppe, welche die Farbe verursacht — chromophore Gruppe —, und eine, welche die Eigenschaft des Färbens, den Farbstoffcharakter bedingt — auxochrome Gruppe (vgl. hierzu und zum folgenden auch den Artikel „Absorption [Lichtabsorption]").

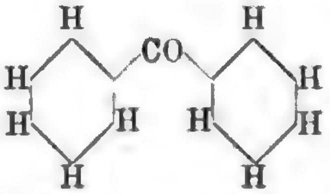
Solche chromophore Gruppen sind die Nitrogruppe $-NO_2$, die Azogruppe $-N{=}N-$; auxochrome Gruppen sind die Hydroxylgruppe $-OH$ und die Aminogruppe $-NH_2$, welche der Substanz schwach saure oder basische Eigenschaften, Phenol- oder Amincharakter verleihen.

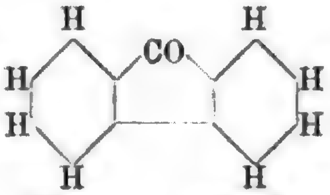
Aus dem farblosen Benzol C_6H_6 wird durch den Eintritt der chromophoren Azogruppe das gelbrote Azobenzol $C_6H_5-N{=}N-C_6H_5$, welches nicht färbt, aber durch Einführung einer Hydroxyl- oder Aminogruppe in das gelbfärbende Oxyazobenzol $C_6H_5-N{=}N-C_6H_4-OH$ oder Aminoazobenzol $C_6H_5-N{=}N-C_6H_4-NH_2$ übergeht.

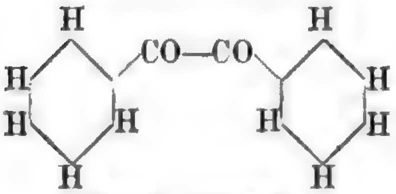
Jeder Stoff, der im sichtbaren Teil des Spektrums eine ausgesprochene Absorption besitzt, ist farbig; liegt jedoch die Absorption im ultravioletten Teil des Spektrums, so erscheint ein solcher Stoff farblos. Dieser

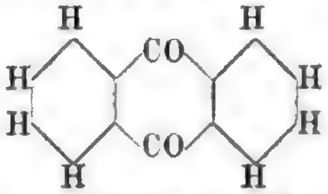
Digitized by Google

Fall trifft zu für die meisten aromatischen Kohlenwasserstoffe, von denen schon der einfachste, das Benzol, eine starke Absorption im Ultraviolett zeigt. Durch chromophore Gruppen wird nun diese Absorption aus dem stärker brechbaren Bezirk des Spektrums nach dem weniger brechbaren hin verschoben und wenn diese Verschiebung stark genug ist, so erscheint der Stoff farbig; rückt also durch den Einfluß einer chromophoren Gruppe ein Absorptionsband aus dem Ultraviolett ins Violett, so zeigt der Stoff eine gelbe, rückt er bis ins Gelb und Rotgelb vor, eine blaue Farbe. Je größer die Molekel des einer Verbindung zugrunde liegenden aromatischen Kohlenwasserstoffs ist, und je ärmer an Wasserstoff, um so auffälliger zeigt sich die Wirkung eines Chromophors und so kann man verstehen, daß ein einfacher aromatischer Stoff, obgleich er einen Chromophor, etwa eine Ketongruppe =CO, enthält, farblos ist, während diese Ketongruppe, wenn sie in einem hochmolekularen oder wasserstoffärmeren Kohlenwasserstoff liegt oder doppelt vorhanden ist, deutliche Färbung hervorruft, wie nachstehendes Beispiel veranschaulicht:


Benzophenon, farblos


Fluorenon, hellgelb


Benzil, hellgelb


Anthrachinon, gelb

Ebenso leuchtet ein, daß einfachere Farbstoffe überwiegend gelb gefärbt sind, verwickeltere mit höherem Molekulargewicht oder mehrfach vorhandenem Chromophor oder gar beidem gleichzeitig rot oder blau; das Absorptionsband rückt aus dem Ultraviolett im ersten Fall ins Violett, im anderen ins Grün oder bis ins Gelb. Zur Veranschaulichung ein Beispiel:

$$HO_3S.C_6H_4N{=}NC_6H_4OH$$
Benzolsulfonsäureazophenol, gelb

$$HO_3S.C_6H_4N{=}NC_{10}H_6OH$$
Benzolsulfonsäureazonaphtol, Naphtolorange

$$HO_3S.C_{10}H_6N{=}NC_{10}H_6OH$$
Naphtalinsulfonsäureazonaphtol, Echtrot A

$$\underset{OH}{HO_3S.C_{10}H_5}N=N\underset{CH_3}{C_6H_3}-\underset{CH_3}{C_6H_3}N=N\underset{\substack{OH\\HO_3S}}{C_{10}H_5}.$$
Naphtolsulfonsäureazoditolylazonaphtolsulfonsäure, Azoblau.

Vgl. den Artikel „Absorption (Lichtabsorption)“.

3. Färbeverfahren. Versucht man mit wässerigen Lösungen von Farbstoffen Gespinstfasern, wie Seide, Wolle, Baumwolle zu färben, so beobachtet man auffällige Verschiedenheiten. Der nämliche Farbstoff erzeugt beispielsweise auf Seide und Wolle eine dauerhafte, nicht auswaschbare Färbung, während er Baumwolle ungefärbt läßt, andererseits färbt von drei chemisch verschiedenen, aber äußerlich durchaus ähnlichen Farbstoffen der eine z. B. nur die Wolle, der andere nur die Baumwolle, der dritte beide Fasern waschecht an. Außerdem findet man, daß Zusätze von sauren, alkalischen oder neutralen Salzen, von freien Säuren, von Seife u. dgl. zu den Farbstofflösungen das Färbevermögen verbessern oder beeinträchtigen und zwar für verschiedene Farbstoffe und verschiedene Gewebestoffe in ganz verschiedener Art. Ferner erzeugt der nämliche Farbstoff auf verschiedenen Gespinstfasern erheblich verschiedene Farbtöne und schließlich bedingt es beträchtliche Unterschiede, je nachdem man eine Faser im losen, versponnenen oder verwobenen Zustand, roh oder gebleicht, der Färbung unterwirft. Zeigen sich solche weitgehende Verschiedenheiten schon bei der einfachsten Art des Färbens durch unmittelbares Aufziehen des gelösten Farbstoffes aus der Lösung auf die Faser — Verfahren der direkten Färbung — so wird die Sache noch verwickelter durch die Benutzung zweier weiterer Färbeverfahren, der Beizenfärbung und der Entwickelungsfärbung.

Das Beizenfärben beruht auf der Bildung einer in Wasser unlöslichen Verbindung des Farbstoffes, eines „Farblackes“. Man

tränkt beispielsweise die Faser mit der Lösung eines Metallsalzes (meist Salze von Aluminium, Chrom, Eisen oder Zinn), das sich auf der Faser in ein unlösliches basisches Salz oder Metallhydroxyd verwandelt und bringt die so „gebeizte" Faser in die Lösung eines geeigneten saueren Farbstoffes — Beizenfarbstoffes —, der mit dem Hydroxyd ein unlösliches, fest haftendes, farbiges Salz bildet. Oder auch umgekehrt: man tränkt die Faser mit Gerbsäure oder ähnlichen hochmolekularen organischen Säuren — Gerbstoffen — und bringt sie in die Lösung eines basischen Farbstoffes, der mit der Gerbsäure ein unlösliches, farbiges Salz erzeugt. Bei guten Beizenfärbungen handelt es sich durchweg um kolloidale Lösungen der Beizen in den Gespinstfasern, nicht um oberflächliche Auflagerung. Es gelten also für die Vorgänge beim Beizenfärben einfach die chemischen Gleichungen für die Salzbildung aus Base und Säure:

1. $Fe(OH)_2 + H_2SO_4 \rightarrow FeSO_4 + H_2O$.
2. Metallbase + Farbstoffsäure → Farblack, (Metallsalz der Farbstoffsäure) + Wasser.
3. Gerbsäure + Farbstoffbase → Farblack, (Gerbsaures Salz der Farbbase) + Wasser.

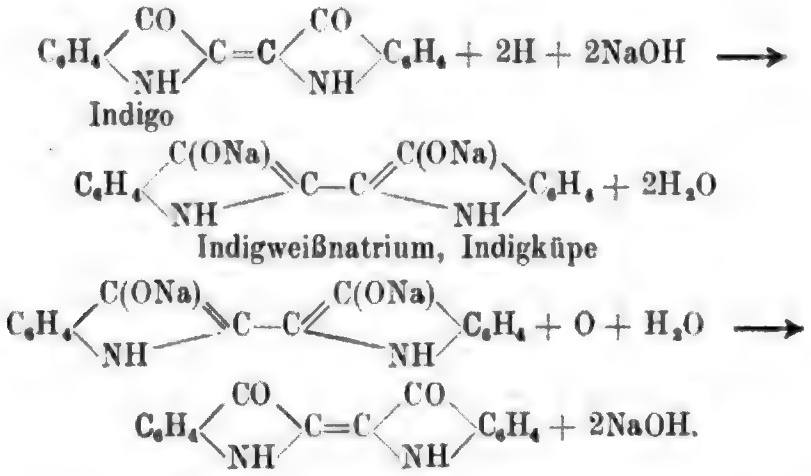
Salze derselben Säuren mit verschiedenen Metallen können verschieden gefärbt sein, da die Farbe eines Salzes vom Anion und vom Kation abhängt und deshalb kann auch der nämliche Farbstoff mit verschiedenen Beizen ganz verschiedene Färbungen erzeugen; so färbt Alizarin auf Aluminiumbeize scharlachrot, auf Chrombeize braunviolett, auf Eisenbeize violettschwarz. Gelegentlich macht man auch in der Färberei von einer besonderen Art Beizenfärbung Gebrauch: erst färbt man das Gewebe mit einem direkt färbenden Farbstoff und dann beizt man ihn mit einem Metallsalz, entweder um einen anderen Farbenton oder eine größere Echtheit zu erzielen, als der direkten Färbung zukommt (Nachchromieren, Nachkupfern).

Das Entwickelungsverfahren, die Erzeugung des Farbstoffes auf dem Gewebe, umfaßt wiederum recht verschiedene Vorgänge. Man tränkt beispielsweise das Gewebe mit einer alkalischen Lösung eines Phenols und bringt es dann in die Lösung einer Diazoverbindung, wodurch ein Azofarbstoff in dem Gewebe entsteht:

$$O_2.C_6H_4NNCl + C_{10}H_7.ONa \rightarrow$$
Nitrodiazobenzolchlorid Naphtolnatrium
$$NO_2.C_6H_4{-}N{=}N{-}C_{10}H_6.OH + NaCl.$$
Pararot

Oder man verwandelt einen unlöslichen Farbstoff durch Reduktion in seine lösliche Leukoverbindung, tränkt mit dieser Lösung das Gewebe und hängt es an die freie Luft, worauf der Luftsauerstoff die Oxydation zu dem ursprünglichen Farbstoff bewirkt, der nun unabwaschbar haftet — Küpenfärberei:

1.
2.



Aus dem Gesagten geht hervor, daß es eine einfache, alle Vorgänge beim Färben einheitlich umfassende Theorie nicht wohl geben kann. Immerhin gewinnt man eine befriedigende Erklärung durch die experimentell weitgehend gestützte Auffassung, daß das Aufziehen eines Farbstoffes auf die Gespinstfaser sehr oft ein chemischer Vorgang, eine Salzbildung, manchmal ein physikalischer Vorgang, eine Lösung des Farbstoffes in der Substanz der Faser und schließlich nicht selten beides gleichzeitig ist. Die meisten sauren und basischen Farbstoffe färben Wolle und Seide unmittelbar, Baumwolle aber nicht. Seide und Wolle sind sehr verwickelt gebaute stickstoffhaltige Verbindungen mit basischem und zugleich saurem Charakter, weil sie, wie z. B. die Aminoessigsäure basische und saure Gruppen enthalten, also mit Säuren und Basen Salze bilden können:

$$NH_2.CH_2.COOH + HCl \rightarrow HCl.NH_2.CH_2.COOH$$
salzsaure Aminoessigsäure

Digitized by Google

$$NH_2.CH_2.COOH + NH_3 \rightarrow NH_2.CH_2.COONH_4$$
aminoessigsaures Ammonium.

Kommt nun Wolle in eine Lösung von Fuchsin, einem Salz der Fuchsinbase, so äußert sich diesem basischen Farbstoff gegenüber die Säureeigenschaft der Wolle, es entsteht sozusagen „wollsaures Fuchsin" als hochmolekulares, in Wasser unlösliches Salz und die vorher an die Fuchsinbase gebundene Säure wird in äquivalenter Menge frei; zu dieser Auffassung des Färbevorgangs stimmt die Tatsache, daß in einer farblosen Lösung der Fuchsinbase Wolle sich mit der roten Farbe der Fuchsinsalze anfärbt. Bringt man umgekehrt Wolle in die violettrote Lösung freien Helianthins, eines sauren Farbstoffes, so färbt sie sich mit der rotgelben Farbe der Helianthinsalze; sie spielt dem sauren Helianthin gegenüber die Rolle einer Base, es entsteht das Salz „helianthinsaure Wolle", hochmolekular und in Wasser unlöslich.

Baumwolle, nahezu reine Zellulose, hat weder saure noch basische Eigenschaften, kann also weder mit basischen noch mit sauren Farbstoffen unter Salzbildung direkt gefärbt werden. Entweder wird die Baumwolle also gebeizt und ihr durch Einlagerung von Metallhydroxyden ein basischer oder durch Gerbsäuren ein saurer Charakter verliehen, so daß sie sich wie Wolle verhält, also saure und basische Farbstoffe unter Salzbildung festhält oder man benutzt ein Entwickelungsverfahren wie die Küpenfärbung. Außerdem gibt es jedoch einige Farbstoffarten, die eine direkte Färbung von Baumwolle gestatten, sogenannte substantive Farbstoffe. Bei diesem Färbevorgang handelt es sich um eine feste Lösung des Farbstoffes in der Baumwollfaser, um einen physikalischen Vorgang, wobei der mehr oder weniger kolloidale Zustand der Faser und des gelösten Farbstoffes eine Rolle spielt (vgl. den Artikel „Disperse Gebilde"). Dieses Färbeverfahren ist also eine Art Ausschüttelungsverfahren und wie bei der gewöhnlichen Ausschüttelung findet auch hier eine bestimmte Verteilung des gelösten Farbstoffes zwischen den beiden Lösungsmitteln, hier Wasser und Baumwolle, statt, das Farbbad wird nicht erschöpft, sondern ein beträchtlicher Teil des Farbstoffes bleibt im Bade zurück. Dementsprechend kann zugunsten der Ausfärbung der Anteil des im Wasser gelöst bleibenden Farbstoffes vermindert werden durch Zusatz von Kochsalz, Glaubersalz, Soda u. dgl., die aussalzend wirken. Für die Richtigkeit der Erklärung des eben besprochenen Färbevorgangs sprechen noch folgende Tatsachen. Eine mit dem nämlichen Farbstoff erzielte direkte Färbung ist auf Wolle meist echter als auf Baumwolle: z. B. ist der Azofarbstoff Kongorot sehr säureempfindlich; seine Scharlachfarbe schlägt schon durch verdünnte Essigsäure augenblicklich in Schwarzblau um. Mit Kongorot gefärbte Baumwolle zeigt genau dieselbe Erscheinung, während unter den nämlichen Umständen kongorot gefärbte Wolle viel echter sich erweist und diesem Farbenumschlag aus Scharlach in Schwarzblau nur in ganz geringem Grade und nur langsam unterliegt: das Rot wird allmählich etwas mißfarbig. Das ist leicht verständlich: denn während der Kongofarbstoff von der Baumwolle einfach unverändert gelöst ist, hat ihn die Wolle unter Salzbildung chemisch gebunden, er ist in der Hauptsache als „kongosaure Wolle" vorhanden und dieses hochmolekulare unlösliche Salz reagiert mit schwachen Säuren nur ganz wenig und langsam unter Bildung von schwarzblauer Kongofarbstoffsäure. Ferner verhält sich kongorot gefärbte Baumwolle, die in ihre Substanz Kongofarbstoff mit seinen sauren Gruppen aufgenommen hat, ähnlich wie Wolle insofern, als sie jetzt mit Fuchsin, Methylviolett und anderen basischen Farbstoffen direkt überfärbt werden kann; die Kongorotfärbung wirkt genau wie eine saure Beize, ein Umstand, der praktisch verwertet wird.

Manche Pflanzenfasern sind nicht wie Baumwolle und Leinen nahezu reine Zellulose, sondern die vornehmlich aus Zellulose bestehenden Zellwände enthalten sogenannte inkrustierende Substanzen eingelagert, darunter oft eiweißähnliche Verbindungen mit sauren und basischen Atomgruppen oder saure Gerbstoffe und deshalb lassen sich derartige Pflanzengespinststoffe, z. B. Jute, ähnlich wie Wolle direkt färben, sie enthalten gewissermaßen die Beizenstoffe schon in sich.

4. Echtheitseigenschaften. Beim Färben eines Stoffes kommt es selbstverständlich nicht nur darauf an, den gewünschten Farbenton zu erzielen, sondern die Färbung muß auch den Einflüssen widerstehen, welchen sie bestimmungsgemäß beim Gebrauch ausgesetzt wird, sie muß bestimmte Echtheitseigenschaften aufweisen. Die Färbung eines Möbelstoffes muß lichtecht, aber weder waschecht noch schweißecht sein, Tischwäsche erfordert keine besonders gute Lichtechtheit, jedoch große Waschechtheit, Wasserechtheit und Säureechtheit; an Tuche sind die umfassendsten Echtheitsanforderungen zu stellen, denn sie müssen echt sein gegen die Einwirkung von Licht und Wasser, von Schweiß und Walke, von Säure und Alkali. Es gibt keinen Farbstoff, welcher

Digitized by Google

allen Echtheitsanforderungen gleichmäßig gut entspricht, wohl aber in reicher, alle Bedürfnisse befriedigender Auswahl solche, welche einer oder mehreren davon sehr vollkommen Genüge leisten. Der weitverbreitete Vorwurf, Teerfarbstoffe seien allgemein unecht, ist ein haltloses Vorurteil. Denn für jede Art von Echtheit hat man heute entsprechende Farbstoffe zur Verfügung und jeglicher Farbenton kann heute mindestens ebenso echt und durchweg billiger und sicherer erzeugt werden als früher mit den aus der Pflanzen- und Tierwelt stammenden „natürlichen" Farbstoffen. Ein Farbstoff braucht doch nicht länger auszuhalten als das damit gefärbte Gewebe und dieser höchste Grad von Echtheit, den man in jedem Fall verständigerweise verlangen kann, wird jetzt schon von vielen künstlichen Farbstoffen erreicht, von manchen sogar überschritten. Dabei darf man nicht vergessen, daß unter den Teerfarben alle Abstufungen von Echtheit vertreten sind, echte Farbstoffe aber meist teurer herzustellen und umständlicher aufzufärben sind als weniger echte, und deshalb dauerhafte Färbungen kostspieliger sind als unechte. Die Verwertung billiger und wenig echter Färbungen ist also berechtigt für minderwertige, wenig haltbare Gewebe. Der schlechte Ruf, den die künstlichen Farbstoffe bis vor wenigen Jahren fast allgemein genossen haben und bei vielen Laien heute noch genießen, ist also zum Teil unbegründet, zum Teil dadurch veranlaßt, daß jahrzehntelang viele Färbereien entweder aus Mangel an chemischen Fachkenntnissen mit schlechten Farbstoffen und schlechten Färbeverfahren gearbeitet oder nach dem Grundsatz „billig und schlecht" gefärbt haben. Unterstützt wurde und wird ein solcher Betrieb in Kunst und Gewerbe durch einen oft unglaublichen Mangel an handwerklichen und chemischen Kenntnissen bei Künstlern und Handwerkern, Kaufleuten und Käufern.

Im folgenden finden die wichtigsten Echtheitseigenschaften eine kurze Erläuterung.

W a s c h e c h t ist eine Färbung, wenn sie die übliche Behandlung in der Wäsche aushält. Wollstoffe dürfen bekanntlich nicht heiß und nicht unter Zusatz von Soda, sondern nur mit lauem Seifenwasser gewaschen werden, während Baumwolle sogar mit Seife und Soda gekocht werden kann. Deshalb muß eine Baumwollfärbung, die den Namen waschecht verdient, einer viel gröberen Behandlung standhalten als eine Wollfärbung. Von einer waschechten Färbung verlangt man auch, daß eine Färbung von einem Faden auf einen anderen damit verwobenen ungefärbten oder anders gefärbten nicht übergeht, „blutet", wie der Fachausdruck lautet.

Etwas verschieden von der Waschechtheit ist die W a s s e r - und die W a l k e c h t h e i t. Manche Färbungen, die gegen Wasser, das nicht rein ist, sondern kleine Mengen von Säuren, Salzen oder Seife enthält, beständig sind, färben ab bei längerer Berührung mit reinem Wasser, eine Eigentümlichkeit, die mit dem mehr oder minder kolloidalen Zustand von Faser und Farbstoff zusammenhängt (vgl. den Artikel „D i s p e r s e G e b i l d e"). Kleiderstoffe müssen wasserecht sein, da sie sonst im Regen, was einer Benetzung mit reinem Wasser gleichkommt, abfärben. Demgegenüber bedeutet Walkechtheit eine etwas verstärkte Waschechtheit, die nur für Wolle in Betracht kommt, weil nur wollene „in der Wolle" oder „im Stück" gefärbte Gewebe der Walke unterworfen werden, um sie durch Verfilzung der Fasern in Tuch zu verwandeln; die Walke besteht in einer stundenlangen Durchknetung mit einer starken Seifenlösung durch die Walkmaschine.

S c h w e i ß e c h t h e i t bedeutet die Widerstandsfähigkeit gegenüber sauren und alkalischen Flüssigkeiten; denn Schweiß kann bald sauer, bald alkalisch reagieren und schweißechte Färbungen dürfen weder durch Essigsäure, noch durch Ammoniak in verdünnter, lauwarmer Lösung Veränderung erleigen.

A l k a l i e c h t e Färbungen werden durch Benutzung mit alkalisch reagierenden Flüssigkeiten, wie Seifen-, Soda- und Ammoniaklösung nicht verändert, s ä u r e e c h t e nicht durch verdünnte starke Säuren, wie Salzsäure. Kleiderstoffe müssen diese beiden Echtheitsarten besitzen, da sie dem alkalisch reagierenden Straßenschmutz wie dem Bespritzen mit Essig, Limonaden und sauren Fruchtsäften ausgesetzt sind. Hervorragend alkali- und säureunechte Farbstoffe finden Verwendung als Indikatoren — Lackmus, Methylorange, Kongorot —, sind aber als Farbstoffe für Gewebe minderwertig.

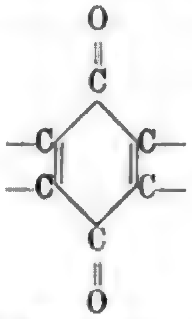
L i c h t e c h t h e i t, Unveränderlichkeit gegen die Wirkung der Sonnenstrahlen gehört zu den wertvollsten Eigenschaften eines Farbstoffes; völlig lichtechte Farbstoffe gibt es überhaupt nicht, aber eine große Anzahl zeigen eine vollauf genügende Beständigkeit im Licht. Beim „Abschießen" oder „Verschießen" werden nicht lichtechte Färbungen entweder nur heller, sie verblassen und das ist der günstigere Fall, oder sie ändern ihren Farbenton, etwa aus Blau in Grau, aus Rot in Braun. Die Frage der Echtheit wird dadurch noch verwickelter, daß der nämliche Farbstoff je nach der

Digitized by Google

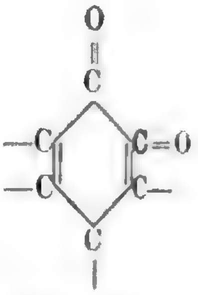
Gespinstfaser, die ihn trägt, oder nach dem Färbeverfahren, durch das er aufgebracht worden ist, verschiedene Arten und Grade der Echtheit zeigen kann (vgl. dazu den Artikel „Photochemie").

5. **Giftigkeit.** Noch weniger als den Vorwurf der Unechtheit verdienen die organischen Farbstoffe den allgemeinen Vorwurf der Giftigkeit; mit wenigen Ausnahmen sind sie nicht giftig. Nur die Pikrinsäure ist ein starkes Gift. Martiusgelb und einige wenige Azofarbstoffe besitzen mäßige Giftwirkung; jedoch auch diese dürfen bei den geringen Mengen, die zur Erzeugung einer Färbung nötig sind (0,2 bis 1,5 % vom Gewicht des zu färbenden Körpers), als harmlos gelten. Einige für den Menschen unschädliche Farbstoffe — Auramin, Fuchsin, Methylviolett, Methylenblau, Phosphin — sind für Mikroorganismen giftig und haben als antiseptische Mittel eine beschränkte Verwendung gefunden. Auramin und Methylviolett sind für diesen Zweck unter der Bezeichnung Pyoctaninum aureum und P. caeruleum im Handel.

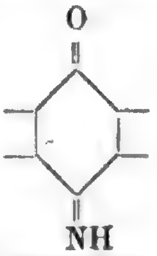
6. **Einteilung der Farbstoffe.** Einen klaren Ueberblick über das große und schwierige Gebiet der Farbstoffe gewinnt man, wenn man sie nach den chromophoren Gruppen einteilt, welche für sie charakteristisch sind. Es kommen nur 4 Chromophore in Betracht: Die einwertige Nitrogruppe $-NO_2$, die zweiwertige, beiderseits an Kohlenwasserstoffreste gebundene Azogruppe $-N{=}N-$, die zweiwertige, an Kohlenstoff gebundene Ketongruppe (Karbonylgruppe) $>C{=}O$ und die vierwertige, an Kohlenstoff gebundene Aethylengruppe $>C{=}C<$. Hieran schließen sich noch eine Anzahl von Abkömmlingen dieser Chromophore, denen ähnliche chromophore Eigenschaften zukommen. So rechnet man zu den zahlreichen Azofarbstoffen mit dem Chromophor $-N{=}N-$ die wenigen Azoxyfarbstoffe mit der ähnlichen Azoxygruppe $-N\!\!<^{O}\!\!>\!\!N-$ als Chromophor. Zu den Ketonfarbstoffen mit dem Chromophor $>C{=}O$ gehören die Ketonimidfarbstoffe mit der chromophoren Gruppe $>C{=}NH$, die Ketoxime mit der Gruppe $>C{=}NOH$ (Isonitrosogruppe) und die Thioketone mit der Gruppe $>C{=}S$ (Thiokarbonylgruppe). Kommen 2 Ketongruppen als Glieder eines Kohlenstoffringes in gegenüberliegender oder benachbarter Stellung vor, so haben wir eine besonders wichtige Art von Diketonen, die Chinone (p- und o-Chinone) mit dem chromophoren Kern



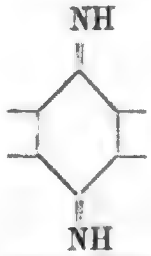
oder



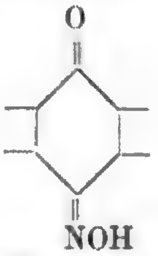
und den entsprechenden Abkömmlingen, z. B.



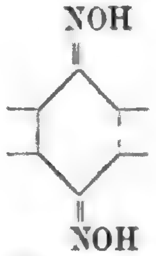
Chinonimid



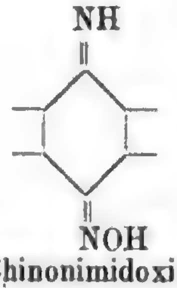
Chinondiimid



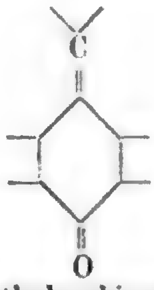
Chinonoxim



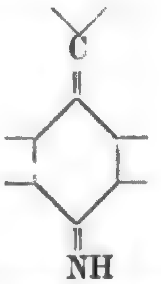
Chinondioxim



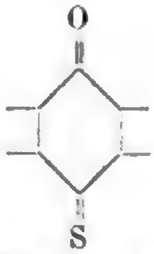
Chinonimidoxim



Methylenchinon



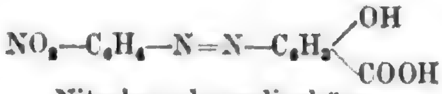
Methylenchinonimid



Thiochinon usw.

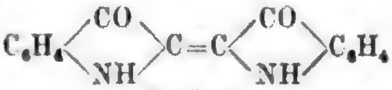
Enthält ein Farbstoff, wie das nicht selten vorkommt, mehrere verschiedene Chromophore, so findet er sich bei demjenigen Chromophor eingereiht, welcher für seinen Farbstoffcharakter maßgebend ist; beispielsweise

Digitized by Google



Nitrobenzolazosalicylsäure

mit den Chromophoren $-NO_2$ und $-N=N-$ bei den Azofarbstoffen,

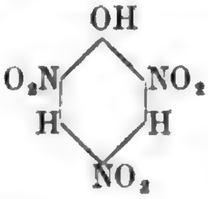


Indigo

mit den Chromophoren $>CO$ und $>C=C<$ bei den Ketonfarbstoffen.

7. Darstellungsverfahren und Beschreibung der wichtigsten Farbstoffe. I. Nitrofarbstoffe. Diese Farbstoffklasse ist gekennzeichnet durch die Nitrogruppe $-NO_2$ und umfaßt nur wenige gebräuchliche Farbstoffe, welche sämtlich Nitrophenole sind, also die auxochrome Gruppe $-OH$ enthalten. Sie werden gewonnen durch Nitrierung von Phenolen auf die Weise, daß man die Phenole erst durch konzentrierte Schwefelsäure sulfoniert und dann mittels Salpetersäure die Sulfongruppen ganz oder teilweise durch Nitrogruppen verdrängt. Die Farbe ist gelb und tritt nur in den Salzen kräftig hervor. In der Natur kommen keine Nitrofarbstoffe vor.

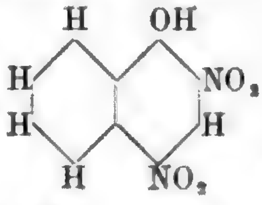
Pikrinsäure



Darstellung: $C_6H_5OH \xrightarrow{H_2SO_4} HO_3SC_6H_4OH \xrightarrow{HNO_3} (NO_2)_3C_6H_2OH$.

Pikrinsäure ist eine starke Säure, kristallisiert in hellgelben Blättchen, schmilzt bei 122,5° und verpufft bei stärkerem Erhitzen, löst sich schwer in Wasser, schmeckt äußerst bitter und wirkt stark giftig. Sie färbt Wolle und Seide aus saurem Bade sehr rein zitrongelb. Trotzdem diese Färbung in jeder Hinsicht mangelhafte Echtheit zeigt, findet sie doch starke Verwendung auf Seide, Wolle und Leder für sich allein und in Mischung, besonders mit grünen Farbstoffen. In dichtem Zustand, erzielt durch Schmelzen oder Pressen, dient die Pikrinsäure als wichtiges Sprengmittel (Melinit, Lyddit).

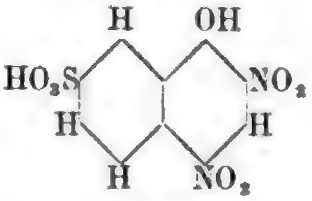
Martiusgelb, Naphtolgelb



Darstellung: $C_{10}H_7OH \xrightarrow{H_2SO_4} (HO_3S)_2\text{-}C_{10}H_5OH \xrightarrow{HNO_3} (NO_2)_2C_{10}H_5OH$.

Findet sich im Handel meist als Na-Salz; gelbes, kristallines Pulver, leicht löslich in Wasser. Schmeckt nicht bitter und ist nur mäßig giftig. Erzeugt in saurem Bade auf Seide und Wolle ein schönes Goldgelb mit etwas besseren Echtheitseigenschaften als die Pikrinsäurefärbung.

Naphtolgelb S.



Darstellung: $C_{10}H_7OH \xrightarrow{H_2SO_4} (HO_3S)_3\text{-}C_{10}H_4OH \xrightarrow{HNO_3} HO_3SC_{10}H_4(NO_2)_2OH$.

Das in Wasser ziemlich schwer lösliche K-Salz und andere Salze dieser Farbstoffsäure färben Seide und Wolle aus saurem Bade im gleichen Ton wie Martiusgelb, aber etwas echter. Die Verbindung wird namentlich in Mischung mit anderen Farbstoffen viel verwendet.

II. Azofarbstoffe. Gekennzeichnet sind die Azofarbstoffe durch die Azogruppe, den beiderseits an aromatische Reste gebundenen Chromophor $-N=N-$. Monoazoverbindungen enthalten die Azogruppe einmal, Disazoverbindungen zweimal, Trisazoverbindungen dreimal; auch höhere Azofarbstoffe sind zwar bekannt, aber nur wenige Tetrakisazoverbindungen haben eine technische Bedeutung. Alle in Betracht kommenden Azofarbstoffe werden fabrikmäßig durch die nämliche Reaktion, die Kuppelung einer Diazoverbindung mit einem Phenol oder einem Amin gewonnen (vgl. den Artikel „Azoverbindungen"). Als Ausgangsstoffe dienen folglich immer zwei Komponenten, einerseits ein primäres Amin, welches diazotiert wird und andererseits ein Phenol oder ein primäres, sekundäres oder tertiäres Amin mit offener p- oder o-Stellung, mit welchem die Diazoverbindung sich verknüpft, kuppelt, unter Abwanderung eines H-Atoms:

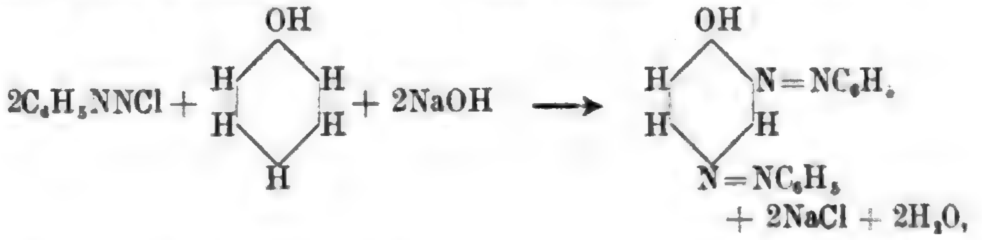
1. $C_6H_5NH_3Cl + HNO_2 \rightarrow C_6H_5NNCl + 2H_2O$
Phenylammoniumchlorid, salzsaures Anilin, Benzoldiazoniumchlorid, Diazobenzolchlorid

2. $C_6H_5NNCl + C_6H_5ONa \rightarrow$
Phenolnatrium

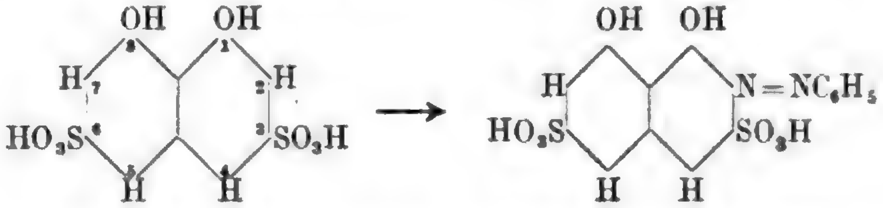
$C_6H_5N=NC_6H_4OH + NaCl$
Benzolazophenol

Im allgemeinen wird für die Kuppelung die p-Stellung vor der o-Stellung bevorzugt und bei offener p-Stellung nur diese besetzt; allein man vermag häufig nicht ohne weiteres den Verlauf der Reaktion sicher vorauszu-

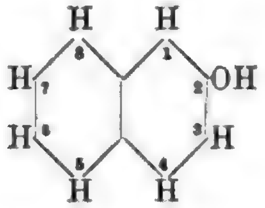
sehen. Denn gelegentlich reagieren 2 Molekel Diazoverbindung und es entsteht ein Disazokörper unter Besetzung eines p- und eines o-Platzes:



und bei Abkömmlingen des α-Naphtols und α-Naphtylamins wird in manchen Fällen trotz offener p-Stellung eine verfügbare o-Stellung aufgesucht; beispielsweise liefert Dioxynaphtalindisulfonsäure (1.8.3.6) mit diazotiertem Anilin gekuppelt Benzolazodioxynaphtalindisulfonsäure (2.1.8.3.6):



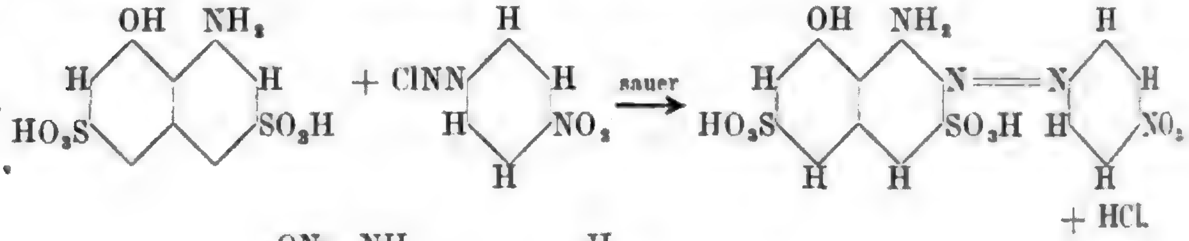
β-Naphtol und β-Naphtylamin besitzen keine offene p-, sondern nur 2 offene o-Stellen, 1 und 3:



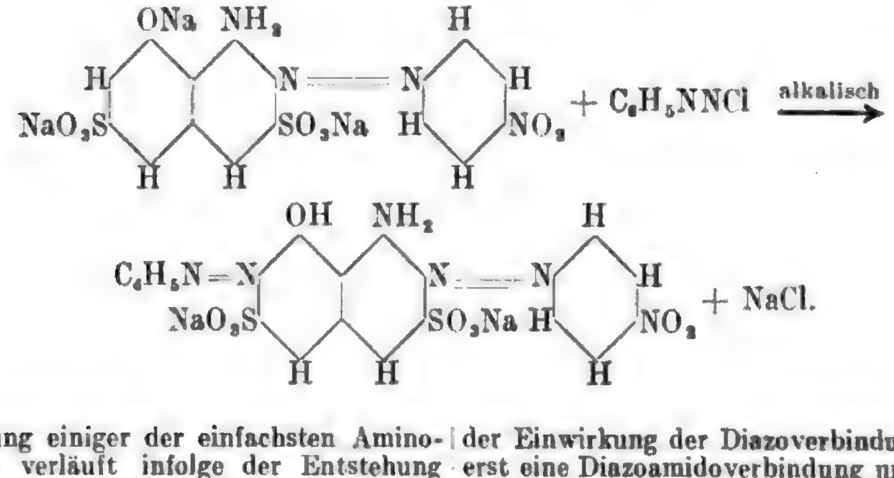
Hier nimmt die Azogruppe, einerlei, was sonst für Substituenten im Naphtalinkern lagern, stets die Stellung (1), nie die andere o-Stellung (3) ein.

Phenole kuppeln am leichtesten in schwach alkalischer oder neutraler, Amine in schwach saurer oder neutraler Lösung. Unter Benutzung dieser Erfahrung kann man bei zu verkuppelnden Verbindungen, die gleichzeitig Phenole und Amine sind, einen oder auch zwei verschiedene Diazokomponenten mit Sicherheit in bestimmte gewünschte Stellungen einsetzen, eine praktisch wichtige Möglichkeit, welche durch das Schema der Darstellung des Naphtolblauschwarz erläutert wird:

1.



2



Die Bildung einiger der einfachsten Aminoazofarbstoffe verläuft infolge der Entstehung eines Zwischenproduktes etwas anders als das bisher angewandte Schema ersehen läßt. Bei der Einwirkung der Diazoverbindung bildet sich erst eine Diazoamidoverbindung und dann lagert sich diese in den Aminoazofarbstoff um:

Digitized by Google

1. $C_6H_5NNCl + C_6H_5NH_2 \rightarrow C_6H_5NN.NHC_6H_5 + HCl$

2. $C_6H_5NN.NHC_6H_5 \rightarrow C_6H_5N{=}NC_6H_4NH_2$.

Die theoretisch so einfache, in wässeriger Lösung bei Zimmerwärme meist rasch und fast quantitativ verlaufende Kuppelungsreaktion erfordert in der Technik doch große Erfahrung und Sorgfalt wegen der leichten Zersetzlichkeit der Diazoverbindungen und der großen Verschiedenheit in der Leichtigkeit und Geschwindigkeit der Kuppelung.

Eine einfache Benennung der äußerst mannigfaltigen Azokörper hat man, wenn man die Namen der durch die Azogruppe verknüpften Stoffe durch das Wort —azo— verbindet:

$C_6H_5N{=}NC_{10}H_7$
Benzolazonaphtalin.

$HO_3SC_6H_4N{=}NC_6H_4N(CH_3)_2$
Benzolsulfonsäureazodimethylanilin, Handelsname: Helianthin.

$HO_3SC_6H_4N{=}NC_6H_3(SO_3H)N{=}NC_{10}H_6OH$
Benzolsulfonsäureazobenzolsulfonsäureazonaphtol, Handelsname: Biebricher Scharlach.

$HO_3S(NH_2)C_{10}H_5N{=}NC_6H_4.C_6H_4N{=}NC_{10}H_5(NH_2)SO_3H$
Aminonaphtalinsulfonsäureazodiphenylazoaminonaphtalinsulfonsäure, Handelsname: Kongorot.

$HOOCC_6H_3(OH)N{=}NC_{10}H_6N{=}NC_{10}H_5\text{-}(OH)SO_3H$
Salicylsäureazonaphtalinazonaphtolsulfonsäure, Handelsname: Diamantschwarz.

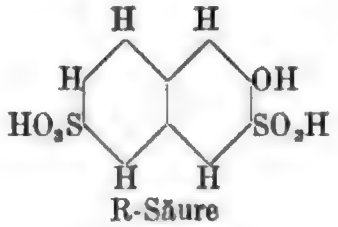
Farbenton und Echtheitseigenschaften der Azofarbstoffe hängen bei gleicher summarischer Zusammensetzung in sehr auffälliger und häufig nicht vorherzusehender Weise ab von der Stellung der chromophoren und auxochromen Gruppen in den Kohlenstoffringen und auch von der Stellung der anderen außerdem noch vorhandenen Atomgruppen, wie Sulfonsäurerest $—SO_3H$, Karboxyl $—COOH$, Methoxyl $—OCH_3$ usw. Gar nicht oder nicht genügend in Wasser lösliche Azofarbstoffe werden löslich durch Einlagerung von Sulfongruppen; diese werden entweder von vornherein in den Farbstoff hineingebracht dadurch, daß man einen oder beide Komponenten in Form einer Sulfonsäure verwendet:

$$C_6H_4\begin{matrix}\diagup SO_3\\ \diagdown NN\end{matrix} + C_{10}H_7ONa \longrightarrow NaO_3SC_6H_4N{=}NC_{10}H_6OH,$$

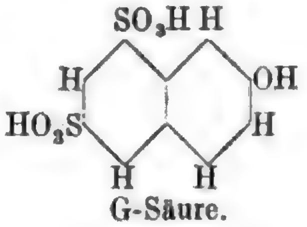
oder den fertigen Azofarbstoff nachträglich sulfoniert:

$$C_6H_5N{=}NC_6H_4NH_2 + H_2SO_4 \longrightarrow C_6H_5N{=}NC_6H_3\begin{matrix}\diagup NH_2\\ \diagdown SO_3H\end{matrix} + H_2O.$$

Wie schon erwähnt, äußern die Sulfongruppen je nach ihrer Stellung in der Molekel auf Farbenton und Echtheit der Farbstoffe verschiedenartige Einflüsse, die teilweise bekannten Regeln folgen. Beispielsweise liefern die beiden nur durch die Stellung einer der beiden Sulfongruppen unterschiedenen β-Naphtoldisulfonsäuren 1 und 2 mit den nämlichen Diazokomponenten gekuppelt verschiedene Färbungen, die eine (1) mehr rotstichige, die andere (2) mehr gelbstichige, daher ihre Handelsnamen:

1. 

R-Säure

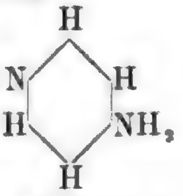
2. 

G-Säure.

Die Anzahl der praktisch verwerteten Azofarbstoffe kommt der aller anderen Teerfarbstoffe zusammen mindestens gleich. Es können im folgenden nur eine kleine Anzahl ausgewählter Vertreter Erwähnung finden, die man für Struktur und Färbeeigenschaften als Typen ansehen darf. In der Natur kommen keine Azofarbstoffe vor.

Fast durchweg finden sich die Azofarbstoffe im Handel als undeutlich kristalline, in Wasser lösliche Pulver, gewöhnlich Na-Salze mit wenig kennzeichnender Färbung, von der Herstellung her verunreinigt durch anorganische Salze und sehr oft mit Kochsalz, Glaubersalz, Dextrin und ähnlichen unschädlichen Stoffen in abgemessenen Mengen absichtlich versetzt, um stets die nämliche bestimmte Farbstärke zu erzielen. Ueber derartiges werden deshalb in den Beschreibungen nur in besonderen Fällen Angaben gemacht.

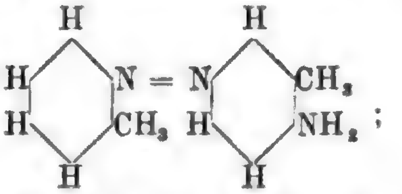
a) Monoazofarbstoffe.

1a. p-Aminoazobenzol $C_6H_5N{=}N$ 

Darstellung: $C_6H_5NH_2 \longrightarrow C_6H_5NNCl + C_6H_5NH_2 \longrightarrow C_6H_5NNNHC_6H_5 \longrightarrow C_6H_5N{=}NC_6H_4NH_2$.

Digitized by Google

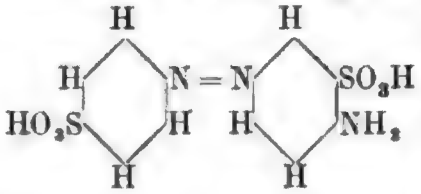
Gelbe, bei 127,5° schmelzende, sublimierbare Nadeln. Bildet rote, durch Wasser der hydrolytischen Spaltung unterliegende Salze und ist als Farbstoff wertlos. Durchaus ähnlich verhält sich das auf gleiche Weise aus o-Toluidin darstellbare nächste Homologe, das Aminoazotoluol



beide Stoffe sind aber wichtige Ausgangspunkte für die Darstellung anderer Farbstoffe.

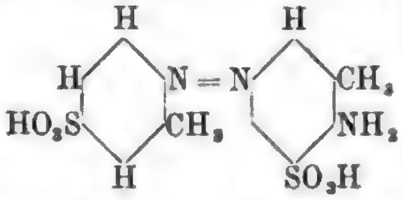
1b. Aminoazobenzoldisulfonsäure, EchtgelbG,

Säuregelb



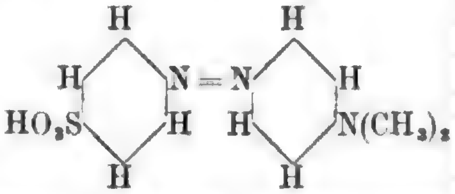
Darstellung: Durch Sulfonierung von 1a mit rauchender Schwefelsäure. Dient zum Färben von Seide und Wolle und zum Wolldruck und hat die natürlichen Farbstoffe aus Curcuma und Gelbholz fast völlig verdrängt. Lichtechtheit befriedigend. Ganz analog das aus Aminoazotoluol erhaltene

Echtgelb R



Beide Echtgelb dienen zur Darstellung des wichtigen Disazofarbstoffes Biebricher Scharlach (Nr. 21) und seiner Homologen.

2. Helianthin, Methylorange

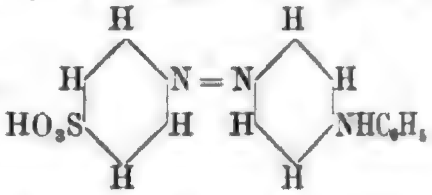


Darstellung: Diazotierte Sulfanilsäure $HO_3SC_6H_4NH_2$ gekuppelt mit Dimethylanilin $C_6H_5N(CH_3)_2$.

Zum Färben und Bedrucken von Wolle; gut lichtecht, aber ganz säureunecht, deshalb die bekannte Benutzung als Indikator; die freie Farbstoffsäure oder richtiger das intramolekulare Salz der Sulfon- mit der Amingruppe. $\begin{matrix} NC_6H_4SO_3 \\ \| \quad / \\ NC_6H_4NH(CH_3)_2 \end{matrix}$ ist violettrot, die Salze, etwa $\begin{matrix} NC_6H_4SO_3Na \\ \| \\ NC_6H_4N(CH_3)_2 \end{matrix}$, d. h. die freie Aminbase, rotgelb gefärbt. Die äußerst verdünnte, blaßgelbe, neutrale Lösung bleibt durch Alkali unverändert, schlägt aber durch sehr geringe Mengen starker Säure in Rot um.

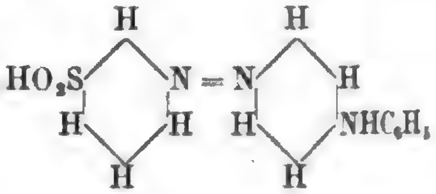
3. Diphenylaminorange, Orange IV,

Tropaeolin OO



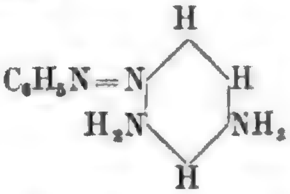
Darstellung: Diazotierte Sulfanilsäure gekuppelt mit Diphenylamin $C_6H_5NHC_6H_5$. Schöner Orangefarbstoff für Wolle und Seide, auch viel benutzt in Mischung mit Echtrot (Nr. 7) und ähnlichen Farbstoffen; Lichtechtheit gut, Säureechtheit besser als bei Nr. 2. Mit gleichen Eigenschaften, nur gelbstichiger, färbt das mittels diazotierter Metanilsäure $HO_3SC_6H_4NH_2$ hergestellte, stark benutzte Metanilgelb,

Tropaeolin G



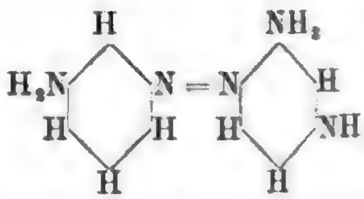
welches auch zum Färben der Papiermasse im Holländer dient.

4. Chrysoidin



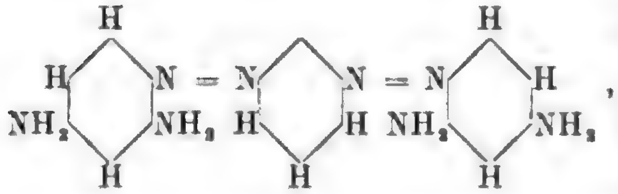
Darstellung: Diazotiertes $C_6H_5NH_2$ gekuppelt mit m-Phenylendiamin $NH_2C_6H_4NH_2$. Braungelber Baumwollfarbstoff auf Tanninbeize. Ungenügend lichtecht und deshalb heute vielfach durch bessere Farbstoffe ersetzt. Absorbiert recht vollkommen die photographisch wirksamen Lichtstrahlen, und damit gefärbter Weingeistfirnis dient als Anstrich der Fensterscheiben von Dunkelkammern.

5. Bismarckbraun, Vesuvin



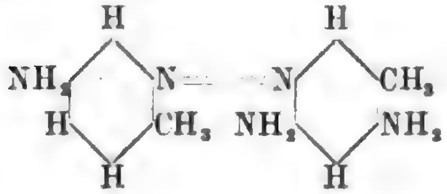
Darstellung: Durch Einwirkung von HNO_2 auf m-Phenylendiamin $H_2NC_6H_4NH_2$. Bismarckbraun ist ein Gemenge aus Aminobenzolazophenylendiamin und dem Disazofarbstoff Phenylendiaminoazobenzolazophenylendiamin.

Digitized by Google

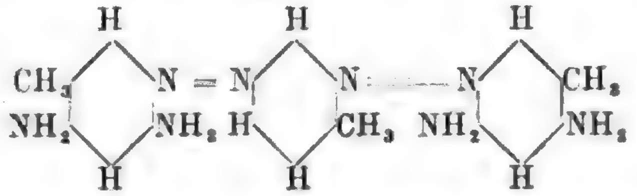


da stets ein großer Teil des Phenylendiamins an beiden Aminogruppen sich diazotiert und demgemäß auch mit 2 Molekeln Phenylendiamin kuppelt.

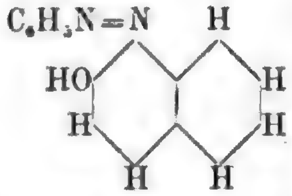
Bismarckbraun erzeugt auf gerbstoffgebeizter Baumwolle beim Färben und Drucken ein lebhaftes Braun und zieht ohne Beize auf Jute und Leder auf, ist aber sehr lichtunecht. Das nämliche gilt für das etwas tiefer und röter färbende homologe Manchesterbraun EE



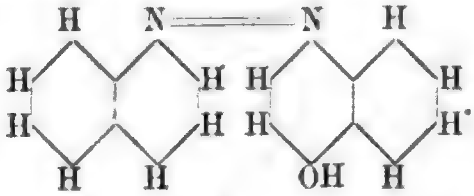
und



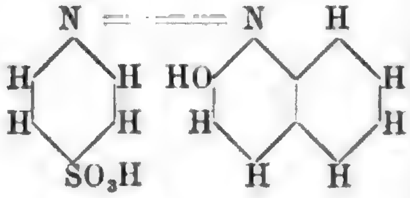
6a. Sudan I



Darstellung: Diazotiertes $C_6H_5NH_2$, gekuppelt mit β-Naphtol $C_{10}H_7OH$. In Wasser unlösliche, tiefgelbe Blättchen, leicht löslich in Alkohol. Findet starke Verwendung zum Färben von Spritfirnissen, Harzen, Oelen, Seifen, Wachs und Paraffin. Die rotgelben Färbungen sind lichtecht. Die nämliche Anwendung hat das analoge Sudanbraun

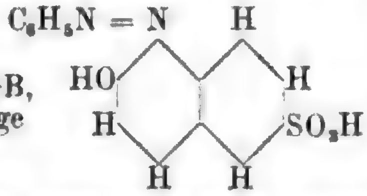


6b. Naphtol-orange, Orange II



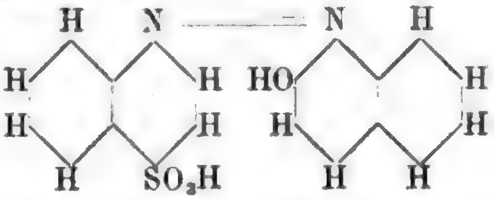
ist eine Sulfonsäure von 6a, gewonnen durch Kuppelung von diazotierter Sulfanilsäure mit β-Naphtol. Färbt Wolle und Seide leuchtend rotgelb mit guter Lichtechtheit. Die schwerlöslichen Ba- und Pb-Salze bilden auf Tonerde, Schwerspat und ähnliche Träger niedergeschlagene vielgebrauchte Lackfarben für Anstrichzwecke. Die gleichen Verwendungen findet das isomere, durch die Stellung der Sulfongruppe unterschiedene

6c. Ponceau 4GB, Croceinorange



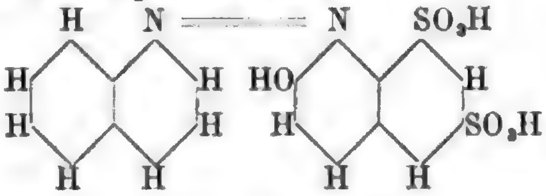
gewonnen durch Kuppelung von diazotiertem $C_6H_5NH_2$ mit β-Naphtolsulfonsäure-Schäffer.

7. Echtrot A



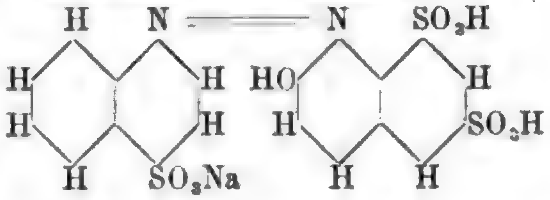
Darstellung: Naphtionsäure $HO_3SC_{10}H_6NH_2$ diazotiert und gekuppelt mit $C_{10}H_7OH$. Tiefes, etwas stumpfes Rot, viel verwendet in der Woll- und Seidenfärberei, sowie in der Wolldruckerei; sehr lichtecht und gut waschecht. Dient auch zur Herstellung von Lacken für Anstrichfarben.

8. Kristallponceau 6R



Darstellung: α-Naphtylamin diazotiert und gekuppelt mit G-Säure $(HO_3S)_2C_{10}H_5OH$. Schön scharlachroter, aber nicht sehr lichtechter Wollfarbstoff.

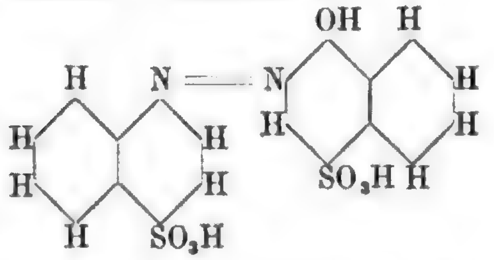
9. Cochenillerot A, Neucoccin



Sulfonsäure von Nr. 8, gewonnen aus diazotierter Naphtionsäure + G-Säure. Feuriges, lichtechtes Rot, sehr viel verwendet in der Woll- und Seidenfärberei sowie zum Wolldruck.

Digitized by Google

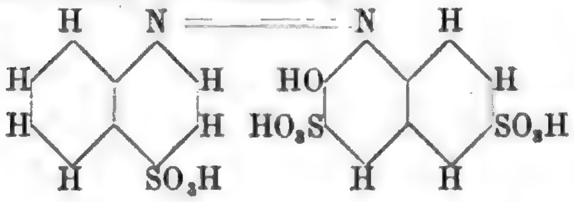
10. Echtrot C, Azorubin S.



Darstellung: Naphtionsäure, diazotiert und gekuppelt mit Nevile-Winther-Säure $HO_3SC_{10}H_6OH$.

Karminroter, lichtechter Farbstoff für Wolle und Seide und für Wolldruck.

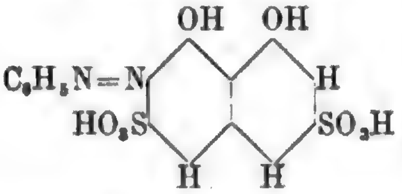
11. Echtrot D, Amaranth



Isomer mit Nr. 9, gewonnen durch Kuppelung von diazotierter Naphtionsäure mit R-Säure.

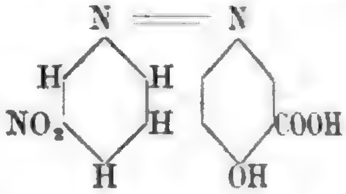
Tiefes Rot, verwendet wie Nr. 7, 9 und 10 mit den nämlichen Echtheitseigenschaften.

12. Chromotrop 2R

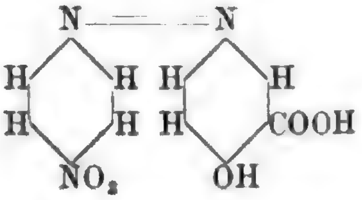


Darstellung durch Kuppeln von diazotiertem Anilin mit Chromotropsäure $(HO_3S)_2$-$C_{10}H_4(OH)_2$. Lebhaft roter Farbstoff für Wollfärbung und Wolldruck, gut lichtecht. Durch die beiden Hydroxyle in 1.8-Stellung im Naphtalinkern besitzt Chromotrop 2R die Eigenschaften eines Beizenfarbstoffes, der mit Metallhydroxyden verschieden gefärbte Lacke gibt. Am wichtigsten ist der tief schwarzviolette Chromlack, der durch nachträgliche Chrombeizung auf der rotgefärbten Faser entsteht und sehr echt ist.

13. Alizaringelb 2G



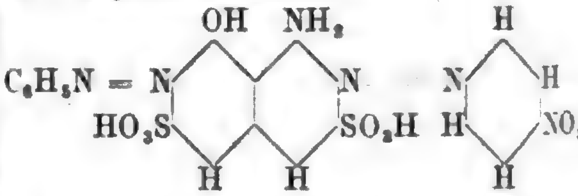
Darstellung: m-Nitranilin $NO_2C_6H_4NH_2$ diazotiert und gekuppelt mit Salicylsäure HOC_6H_4COOH. Wichtig sind nicht die direkten Färbungen, sondern nur die Beizenfärbungen, und zwar der Chromlack. Er liefert ein Olivgelb von guten Echtheitseigenschaften und dient zum Färben und Bedrucken von Wolle und Baumwolle. Die analoge p-Nitroverbindung, Alizaringelb R



liefert unter den nämlichen Bedingungen ein Braunorange.

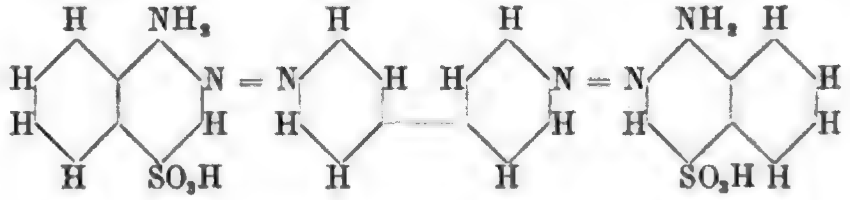
b) Disazofarbstoffe.

14. Naphtolblauschwarz



Darstellung: Aminonaphtoldisulfonsäure H $(HO_3S)_2C_{10}H_4(NH_2)OH$ wird erst sauer mit diazotiertem p-Nitranilin, hierauf alkalisch mit diazotiertem Anilin gekuppelt. Erzeugt auf Wolle beim Färben und beim Drucken ein echtes Blauschwarz.

15. Kongorot

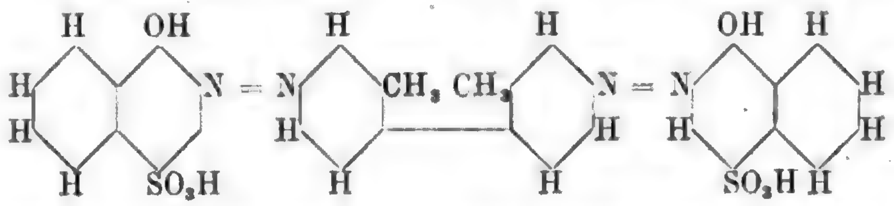


Darstellung: Benzidin $NH_2C_6H_4.C_6H_4NH_2$ diazotiert (Bisdiazodiphenyl) und gekuppelt mit 2 Mol. Naphtionsäure $HO_3SC_{10}H_6NH_2$.

Kongorot und die anderen Benzidinfarbstoffe (Nr. 16. 17 und 18) zeichnen sich durch die Eigentümlichkeit aus, Baumwolle und Leinen direkt anzufärben und finden deshalb in der Baumwollfärberei eine ausgedehnte Anwendung, gleichzeitig aber auch zum Färben von Wolle und Halbwolle. Kongorot erzeugt auf Baumwolle ein nicht sehr reines Scharlach, das weder licht- noch säureecht ist; die Färbung auf Wolle ist schöner und wesentlich echter. Kongorot wird als Indikator benutzt, dessen Rot durch Säure in Blau umschlägt.

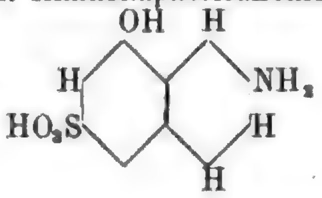
Digitized by Google

16. Azoblau



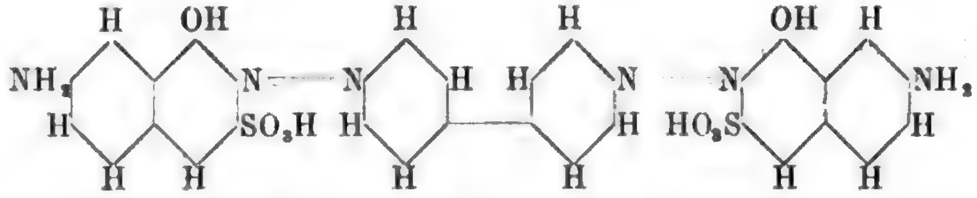
Darstellung: Diazotiertes Tolidin $NH_2C_6H_3$-$(CH_3)\cdot(CH_3)C_6H_3NH_2$ gekuppelt mit Nevile-Winther-Säure. Dient zum Färben von Baumwolle und Leinen, Wolle, Halbwolle und Halbseide und liefert ein Violettblau, dessen Lichtechtheit auf Baumwolle und Leinen mäßig, auf Wolle gut ist.

2 Mol. Aminonaphtolsulfonsäure G



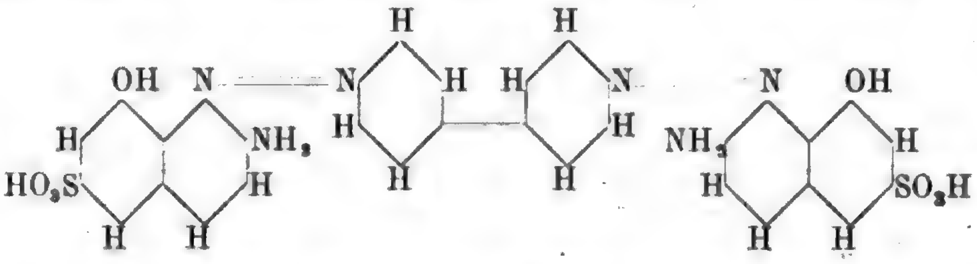
liefern mit diazotiertem Benzidin gekuppelt in alkalischer Lösung Diaminschwarz RO, in saurer Diaminviolett N.

17a. Diamin-schwarz RO



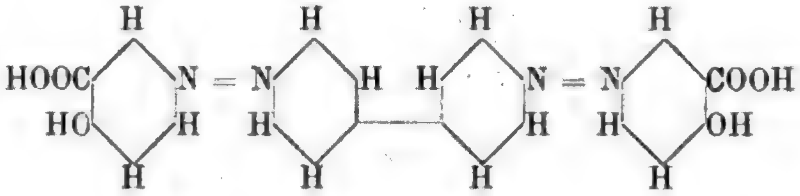
Dient zum Schwarzfärben von Baumwolle, Leinen und Seide; Lichtechtheit gut.

17b. Diamin-violett

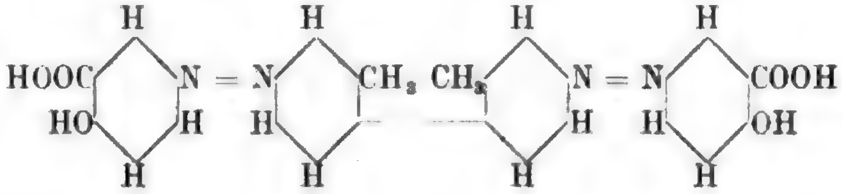


Erzeugt auf Leinen und Baumwolle ein ziemlich reines, aber nur mäßig lichtechtes Violett.

18. Chrysamin G



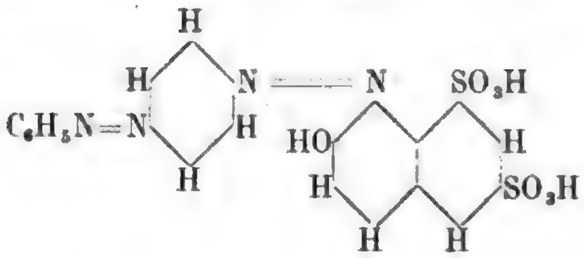
Darstellung: Diazotiertes Benzidin, gekuppelt mit 2 Mol. Salicylsäure. Findet starke Verwendung zum Gelbfärben von Baumwolle und Leinen; die Färbungen sind sehr lichtecht, echter als bei allen anderen Benzidinfarbstoffen, aber nicht alkaliecht; die Farbe schlägt durch Alkali aus Reingelb in Gelbrot um. Das homologe Chrysamin R



aus diazotiertem Tolidin hat gleiche Verwendung und Eigenschaften, aber einen rotstichig gelben Farbenton.

Digitized by Google

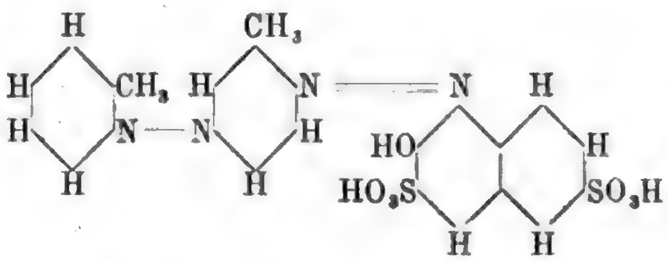
19. Baumwollscharlach
Brillantcrocein,



Darstellung: Aminoazobenzol $C_6H_5N=NC_6H_4NH_2$ diazotiert und gekuppelt mit G-Säure $(HO_3S)_2C_{10}H_5OH$.

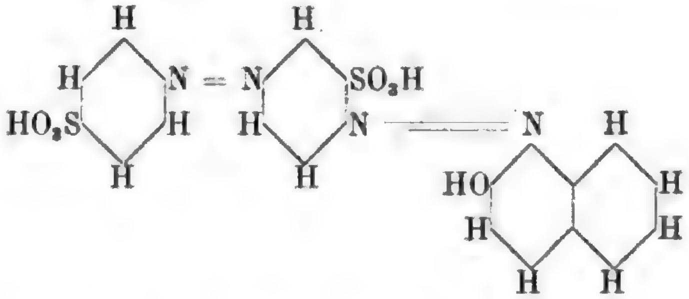
Viel gebraucht zum Färben von Wolle und Seide, von Baumwolle mit Alaunbeize und von Papier im Holländer. Die Wollfärbungen haben gute Echtheitseigenschaften, die Baumwollfärbungen dagegen sind mangelhaft licht-, wasch- und wasserecht. Die Seidefärbung ist lichtecht und ausreichend wasserecht.

20. Tuchrot B



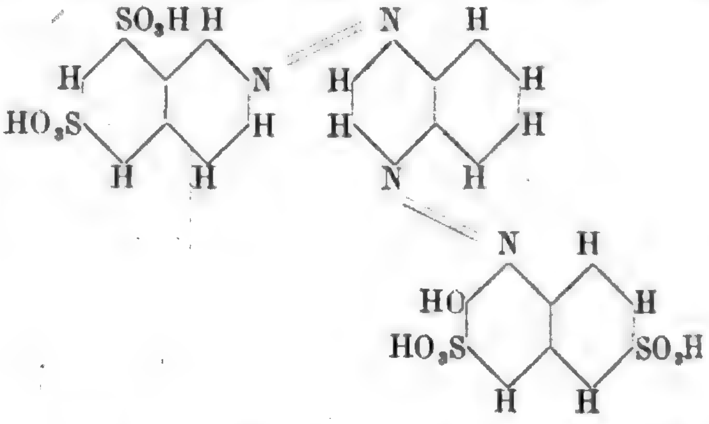
Darstellung: Aminoazotoluol $CH_3C_6H_4N=NC_6H_3(CH_3)NH_2$ diazotiert und gekuppelt mit R-Säure $(HO_3S)_2C_{10}H_5OH$. Färbt Wolle und Seide tiefrot mit sehr guten Echtheitseigenschaften. Die anderen Tuchrotmarken haben ähnliche chemische Struktur und ähnliche Verwendung.

21. Biebricher
Scharlach



Gewonnen durch Kuppelung von diazotierter Aminoazobenzoldisulfonsäure mit β-Naphtol. Findet starke Verwendung zum Färben von Wolle, Seide, Leder und Papier. Der Farbstoff ist sehr farbkräftig und lichtecht, aber auf Seide nicht wasserecht.

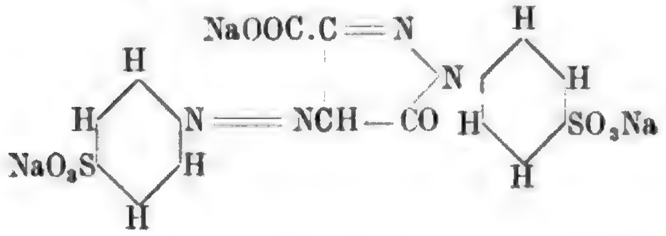
22. Naphtolschwarz,
Brillantschwarz B



Darstellung: Amino-G-Säure $(HO_3S)_2C_{10}H_5NH_2$ wird diazotiert und in saurer Lösung mit α-Naphtylamin gekuppelt, hierauf die so erhaltene Aminoazonaphtalindisulfonsäure $(HO_3S)_2C_{10}H_5N=NC_{10}H_6NH_2$ diazotiert und in alkalischer Lösung mit R-Säure $(HO_3S)_2C_{10}H_5OH$ gekuppelt. Zum Färben und Bedrucken von Wolle; viel gebraucht in der Hutfärberei. Sehr lichtecht, waschecht und genügend walkecht.

c) Pyrazolonazofarbstoffe

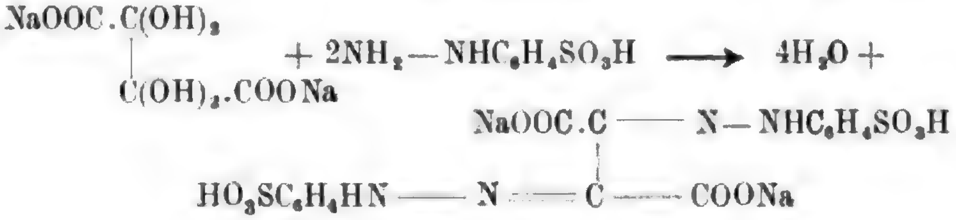
23. Tartrazin



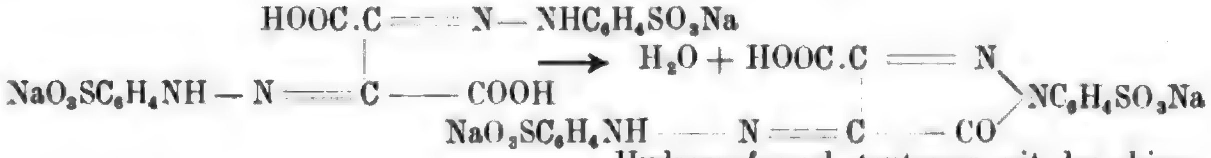
Das Tartrazin (vgl. den Artikel „Heterocyklische Systeme") enthält als Chromophore eine Azogruppe und eine Karbonylgruppe; jene ist für die Farbstoffeigenschaften maßgebend.

Darstellung: Dioxyweinsaures Natrium wird mit 2 Molen Phenylhydrazinsulfonsäure in wässeriger Lösung erwärmt; das erst entstehende Dihydrazon schließt unter H_2O-Abspaltung einen Pyrazolonring und die mit Soda neutralisierte und eingedampfte Flüssigkeit liefert dann den Farbstoff als Trinatriumsalz:

1.



2.



Hydrazonformel, tautomer mit der obigen Azoformel des Tartrazins.

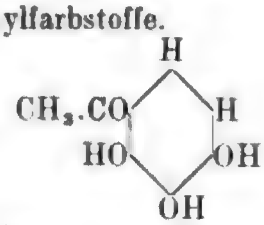
Tartrazin gibt auf Seide und Wolle beim Färben und Drucken ein reines, leuchtendes Gelb von vorzüglicher Echtheit in jeder Hinsicht und hat vorteilhaft die weniger echten gelben Pflanzenfarbstoffe ersetzt.

III. Ketonfarbstoffe.

Die Ketonfarbstoffe (vgl. den Artikel „Ketone") enthalten als Chromophor die Karbonylgruppe $>C=O$, oder Abkömmlinge derselben, z. B. die Ketonimidgruppe $>C=NH$, als auxochrome Gruppen —OH oder—NH_2. Zu dieser Farbstoffklasse gehören außer einigen wichtigen Teerfarbstoffen eine Anzahl pflanzlicher und tierischer Farbstoffe, denen früher eine viel größere praktische Bedeutung zukam als heute, wo sie mehr oder minder verdrängt sind durch künstliche Farbstoffe, die ähnliche Farbentöne liefern, oder, mit ihnen identisch, durch Synthese gewonnen werden.

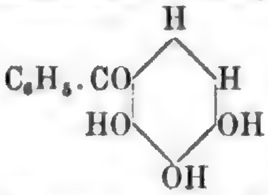
a) Karbonylfarbstoffe.

1. Gallacetophenon, Alizaringelb C



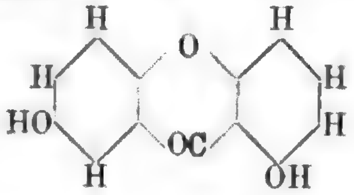
Darstellung: Erhitzen von Pyrogallol $C_6H_3(OH)_3$ mit Essigsäure $CH_3.COOH$ in Gegenwart von Chlorzink: $CH_3.COOH + C_6H_3(OH)_3 \rightarrow CH_3.CO.C_6H_2(OH)_3 + H_2O$.

Blaßgelbe, bei 168° schmelzende Blättchen. Beizenfarbstoff, der mit Tonerdebeize ein mäßig lichtechtes Olivgelb erzeugt und zum Färben und Bedrucken von Baumwolle viel gebraucht wird. Gleiche Verwendung findet das homologe, aus Pyrogallol und Benzoesäure dargestellte Trioxybenzophenon



unter dem Namen Alizaringelb A; die Färbungen sind braungelb und gut lichtecht. Für direkte Färbungen werden beide Farbstoffe nicht verwertet und auch alle übrigen natürlichen und künstlichen Karbonylfarbstoffe, von denen im folgenden einige Vertreter angeführt sind, werden ausschließlich auf Metallbeizen gefärbt.

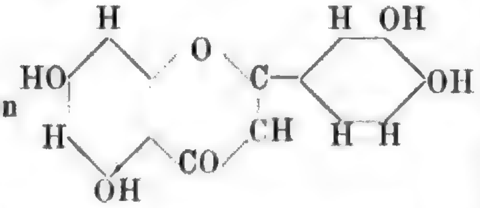
2. Euxanthon



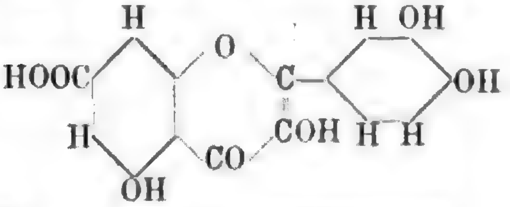
Digitized by Google

Aus dem Harn von Kühen, die mit Mangoblättern gefüttert werden, gewinnt man in Indien den Farbstoff Piuri, der als Malerfarbe unter dem Namen „Indischgelb" wertvoll ist. Indischgelb ist ein Gemisch aus Euxanthon und dem Mg-Salz der Euxanthinsäure; diese ist die Glukuronsäureverbindung des Euxanthons: $C_{13}H_8O_4$ + HOC.CH-(OH).CH(OH).CH(OH).CH(OH).COOH und entsteht beim Durchgang des Euxanthons durch den Tierkörper. Die synthetische Darstellung des Euxanthons hat rein wissenschaftliche Bedeutung.

3. Luteolin

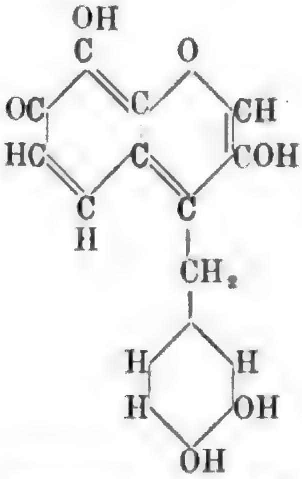


ist der Farbstoff des Wau, des Krautes von Reseda luteola, und findet heute noch eine beschränkte Verwendung, um auf alaungebeizter Seide ein schönes, sehr echtes Gelb zu erzeugen. In der Kattundruckerei wird der gelbe Zinklack und der braungelbe Chromlack des Rhamnetins,



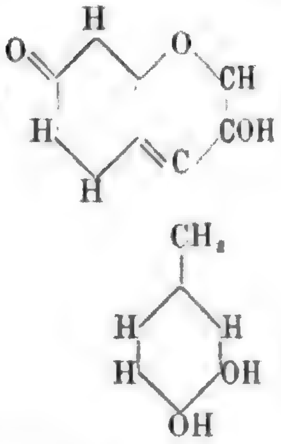
eines dem Luteolin naheverwandten Farbstoffes aus den Gelb- oder Kreuzbeeren benutzt. Auch das Morin, der färbende Bestandteil des Gelbholzes, gehört in diese Reihe.

4a. Hämatein



bildet sich aus Hämatoxylin durch Oxydation an der Luft: Hämatoxylin ist der wesentliche Bestandteil des Blau- oder Campecheholzes von Hämatoxylon campechianum. In der Woll- und Baumwollfärberei und -druckerei finden die schwarzen Eisen- und Chromlacke des Hämateins beträchtliche Verwendung.

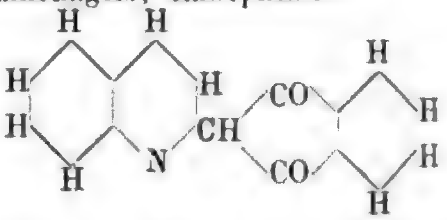
4b. Brasilein



steht zum Brasilin in der nämlichen Beziehung wie Hämatein zum Hämatoxylin. Brasilin findet sich im Fernambukholz, dem Holz verschiedener Caesalpiniaarten aus Brasilien. Auf Alaunbeize liefert es ein ähnliches Rot wie Alizarin und ist deshalb für Wolle und Baumwolle viel verwendet worden, heute aber großenteils verdrängt durch das ungleich echtere Alizarin oder durch billigere, aber immer noch echtere Azofarbstoffe.

5. Karminsäure. Zu den Oxyketonfarbstoffen gehört vermutlich auch die in ihrer Struktur noch nicht sicher erkannte Karminsäure. Sie ist der färbende Bestandteil der Cochenille, der getrockneten weiblichen Schildläuse einiger Kaktusarten. Karminsäure ist ein Beizenfarbstoff, dessen Zinnoxydlack karminrot ist und früher namentlich in der Wollfärberei sehr wichtig war; heute ist er völlig ersetzt durch rote Azofarbstoffe, namentlich Echtrot C (Nr. 10), Biebricher Scharlach (Nr. 21) und ähnliche. Die schöne, aber lichtunechte Malerfarbe Karmin besteht wesentlich aus dem Aluminiumlack der Karminsäure. Karminlösung besitzt auch vielseitige Verwendung in der mikroskopischen Technik zum Färben mikroskopischer Präparate (hierüber Näheres bei Eosin).

6. Chinolingelb, Chinophtalon

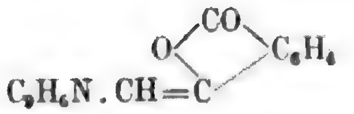


Darstellung: Durch Zusammenschmelzen von Chinaldin und Phtalsäureanhydrid:

$$C_9H_6N.CH_3 + C_6H_4\langle{}^{CO}_{CO}\rangle O \rightarrow$$

$$C_9H_6N.CH\langle{}^{CO}_{CO}\rangle C_6H_4 + H_2O;$$

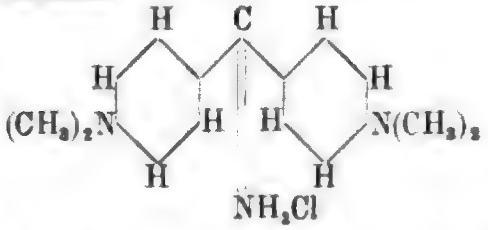
dabei entsteht ein farbloses, isomeres Nebenprodukt, dem man die Formel



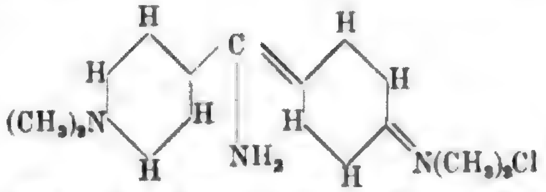
zuschreibt. Chinoüngelb kristallisiert aus Sprit in gelben, bei 235° schmelzenden Nadeln, die sich in Wasser nicht lösen. Durch Behandlung mit rauchender Schwefelsäure erhält man eine Disulfonsäure, deren Natriumsalz in Wasser leicht löslich ist, Chinolingelb wasserlöslich heißt und auf Wolle ein hervorragend reines Gelb von guten Echtheitseigenschaften erzeugt; seiner ausgiebigeren Verwendung steht nur der hohe Preis etwas im Wege. Aehnliche wertvolle Farbstoffe lassen sich auch aus gebromtem oder gechlortem Chinaldin und aus chlorierten Phtalsäureanhydriden aufbauen.

b) Ketonimidfarbstoffe.

7. Auramin



Es darf als festgestellt gelten, daß die Salzbildung an der Ketonimidgruppe $>C=NH$ stattfindet und nicht im Sinne der isomeren Formel:



an einem Dimethylanilinkern, wonach das Auramin ein Methylenchinonimidabkömmling wie die Triphenylmethanfarbstoffe wäre.

Darstellung: Schmelzen von Michlerschem Keton mit Salmiak in Gegenwart von Chlorzink:

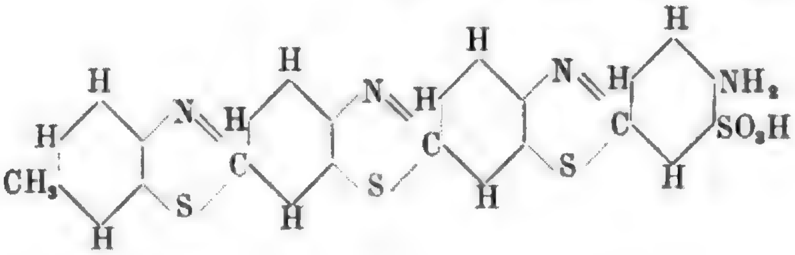
$$(CH_3)_2NC_6H_4-CO-C_6H_4N(CH_3)_2 + NH_4Cl \rightarrow H_2O + (CH_3)_2NC_6H_4-\underset{NH_2Cl}{C}-C_6H_4N(CH_3)_2.$$

Auramin und das homologe, isomere Ditolylderivat, Auramin G

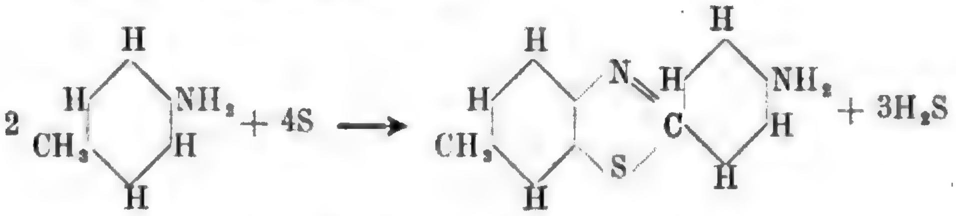
$$(CH_3)HNC_6H_3(CH_3-\underset{NH_2Cl}{C}-(CH_3)C_6H_3NH(CH_3)$$

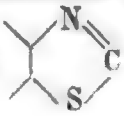
sind gelbe basische Beizenfarbstoffe für mit Tannin gebeizte Baumwolle, Ramie und Leinen und werden zum Färben und Drucken als Ersatz des viel unechteren Curcumins (aus Curcuma) in großem Umfang verwendet, nicht allein für Gelb, sondern auch in Mischung mit Safranin und Fuchsin zu Scharlachtönen und mit Malachitgrün oder Methylenblau zu gelbgrünen Tönen. Seide und Wolle werden ohne Beize mit befriedigender Echtheit angefärbt und deshalb findet Auramin auch zum Färben und Bedrucken von Wolle und Seide Anwendung.

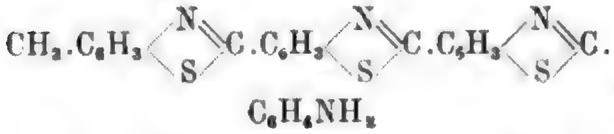
8. Primulin



Darstellung: Beim Schmelzen von p-Toluidin mit Schwefel entsteht zunächst Dehydrothiotoluidin:



Dehydrothiotoluidin ist ein schwacher, blaßgelber Farbstoff, der als Chromophor die substituierte Karbonylimidgruppe $>C=NH$ als Bestandteil eines heterozyklischen Fünfringes  und als Auxochrom die Aminogruppe $-NH_2$ enthält. Nun besitzt das Dehydrothiotoluidin aber auf der einen Seite eine Methylgruppe, auf der anderen eine Aminogruppe in ganz entsprechender Stellung wie das p-Toluidin und wie von diesem 2 Molekel mit 4S reagieren, so tun dies bei fortgesetztem Schmelzen mit Schwefel auch je 2 Dehydrothiotoluidinmolekel, wodurch die Primulinbase

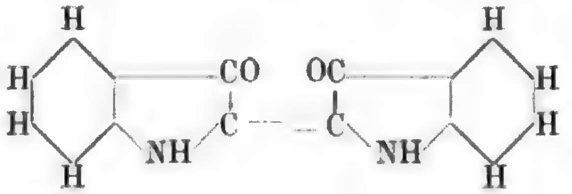


entsteht. Wahrscheinlich geht dieser Kondensationsprozeß in gleicher Weise noch weiter zu noch höhermolekularen Verbindungen, die im käuflichen Primulin vorkommen. Um die Primulinbase in Wasser löslich und somit als Farbstoff verwertbar zu machen, wird sie mit konzentrierter Schwefelsäure sulfoniert; die Sulfonsäure kommt als Na-Salz in den Handel. Primulin färbt nicht nur Wolle und Seide, sondern auch nach Art der Benzidinfarbstoffe Baumwolle und Leinen direkt waschecht an; wegen ihrer mangelhaften Lichtechtheit macht man aber von diesen Färbungen nur beschränkten Gebrauch. Weit häufigere Verwendung findet Primulin als Entwickelungsfarbstoff. Als primäres Amin läßt es sich diazotieren und mit Aminen und Phenolen zu Azofarbstoffen kuppeln; die Diazotierung und Kuppelung läßt sich auch auf dem mit Primulin gefärbten Gewebe leicht durchführen und eine Reihe kräftiger scharlachroter, tiefroter und brauner Färbungen werden namentlich auf Baumwolle viel benutzt; sie sind waschecht, aber meist wenig lichtecht. Der Azofarbstoff aus diazotiertem Primulin mit β-Naphtol ist alizarinrot (türkischrot), mit Naphtolsulfonsäure (2.6) scharlach, mit m-Phenylendiamin lebhaft braun.

c) Indigofarbstoffe.

Alle zur Indigofamilie gehörigen Farbstoffe (vgl. den Artikel „I n d i g o g r u p p e") enthalten zweimal den Chromophor $>C=O$ und einmal den Chromophor $>C=C<$, stets in der Verknüpfung —CO—C=C—CO—; durch Reduktion entsteht daraus —C(OH)=C—C=(HO)C—, die Leukoverbindung des betreffenden Indigofarbstoffes. Diese Leukoverbindungen zeigen die Eigenschaften von Phenolen, denn die Gruppen —C(OH)= sind Glieder von Ringen, und bilden leicht lösliche Alkalisalze, Küpen, welche sich an der Luft leicht oxydieren unter Rückbildung des Farbstoffes, der in Wasser unlöslich ist. Ein mit der Lösung des Alkalisalzes einer Leukoverbindung getränktes Gewebe entwickelt auf sich beim Aushängen an die Luft den Indigofarbstoff — Küpenfärberei. Für alle Glieder der Indigofamilie ist die Küpenfärberei das übliche Verfahren, weil es hervorragend echte Färbungen liefert. Der andere Weg, durch Sulfonierung lösliche Indigofarbstoffe zu gewinnen, hat nur geringe Bedeutung.

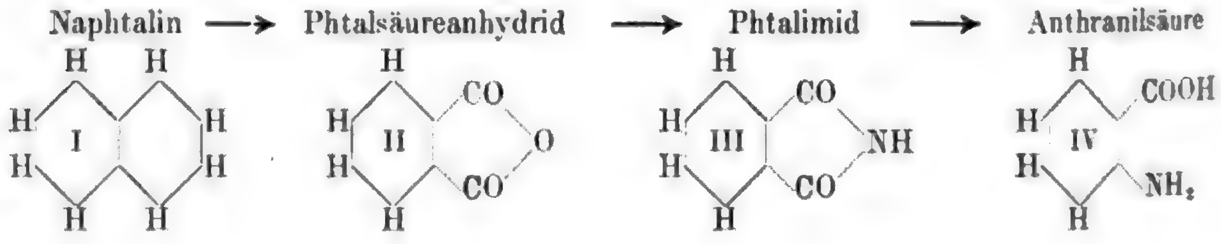
9. Indigblau, Indigotin

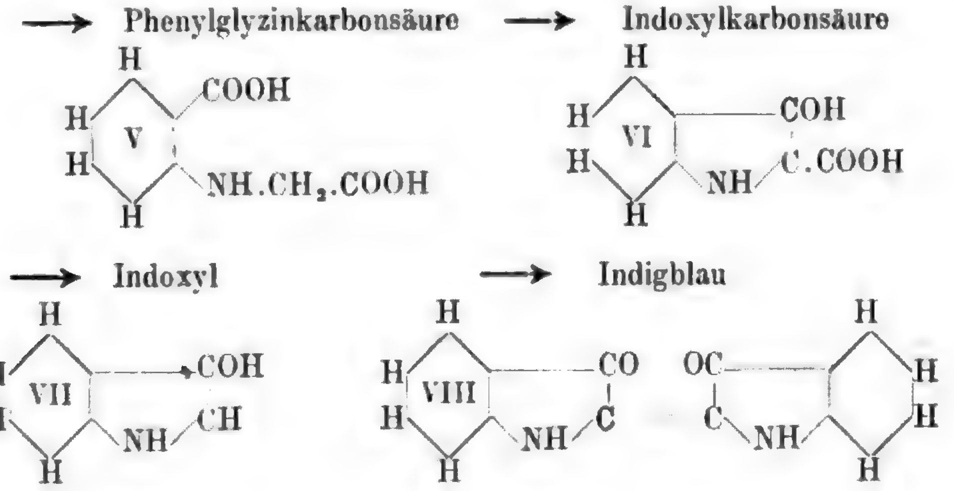


Indigblau ist der wertvolle Bestandteil des natürlichen Indigo und wird heute überwiegend fabrikmäßig synthetisch dargestellt. Es bildet ein dunkelblaues, kupferrot schimmerndes Pulver und sublimiert bei hoher Temperatur in kupferroten Prismen. Unlöslich in den gewöhnlichen Lösungsmitteln, auch in Alkalien und verdünnten Säuren, bildet es mit konzentrierten starken Säuren Salze, die durch Wasser sofort hydrolytisch gespalten werden.

Der aus Indigoferaarten gewonnene natürliche Indigo enthält zwischen 20% und 90% schwankende Mengen an Indigblau, daneben Indigrot, Indigbraun und Indigleim; die Verwendung von Waid, Isatis tinctoria, zur Gewinnung von Indigo hat schon längst aufgehört. Von den zahlreichen synthetischen Darstellungsverfahren des Indigblaus werden heute zwei im großen durchgeführt, die theoretisch sehr ähnlich sind; die Wege, welche die beiden Verfahren 1 und 2 einschlagen, werden durch folgende Formeln erläutert:

1. Verfahren:





Umwandlung I zu II wird bewirkt durch Oxydation mittels heißer konzentrierter Schwefelsäure in Gegenwart von Quecksilbersulfat als Katalysator; II zu III durch Erhitzen mit gasförmigem Ammoniak:

$$C_6H_4\left\langle{}^{CO}_{CO}\right\rangle O + NH_3 \longrightarrow C_6H_4\left\langle{}^{CO}_{CO}\right\rangle NH + H_2O.$$

III zu IV durch Oxydation mit unterchlorigsaurem Na:

$$C_6H_4\left\langle{}^{CO}_{CO}\right\rangle O + NaOCl + 3NaOH \longrightarrow C_6H_4\left\langle{}^{COONa}_{NH_2}\right. + NaCl + Na_2CO_3 + H_2O.$$

IV zu V durch Einwirkung von monochloressigsaurem Na in kalter wässeriger Lösung:

$$C_6H_4\left\langle{}^{COONa}_{NH_2}\right. + ClCH_2.COONa \longrightarrow C_6H_4\left\langle{}^{COONa}_{NH.CH_2.COOH}\right. + NaCl.$$

(Andere Wege für diese Umwandlung müssen hier übergangen werden.)

V zu VI und VI zu VII durch Schmelzen mit Alkali:

$$C_6H_4\left\langle{}^{CO-ONa}_{NH-CH_2.COONa}\right. \longrightarrow H_2O + C_6H_4\left\langle{}^{CONa}_{NH}\right\rangle C.COONa;$$

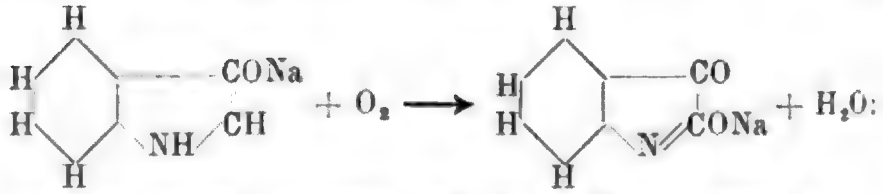
$$C_6H_4\left\langle{}^{CONa}_{NH}\right\rangle C.COONa + NaOH \longrightarrow C_6H_4\left\langle{}^{CONa}_{NH}\right\rangle CH + Na_2CO_3.$$

VII zu VIII durch Oxydation der wässerigen Lösung der Alkalischmelze mittels eingeblasener Luft:

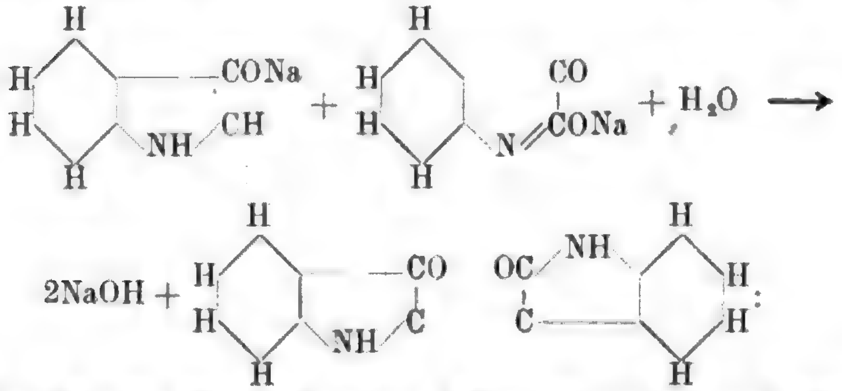
$$2C_6H_4\left\langle{}^{CONa}_{NH}\right\rangle CH + O_2 \longrightarrow 2NaOH + C_6H_4\left\langle{}^{CO}_{NH}\right\rangle C = C\left\langle{}^{CO}_{NH}\right\rangle C_6H_4.$$

Dabei tritt als Nebenprodukt der auch im natürlichen Indigo vorkommende, dem Indigblau isomere rote Farbstoff Indirubin auf, wie folgende Formeln anschaulich machen:

Digitized by Google

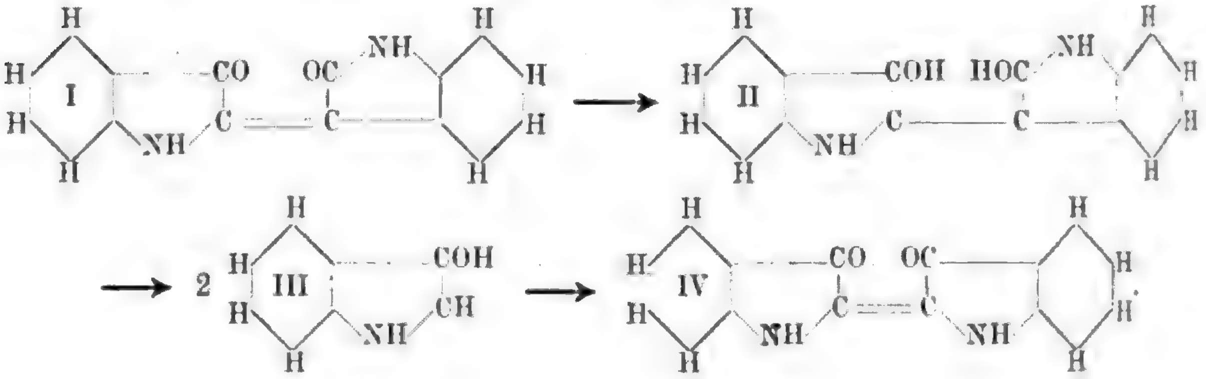
a. 

in der Schmelze Oxydation des Indoxyl-Na zu Isatin-Na.

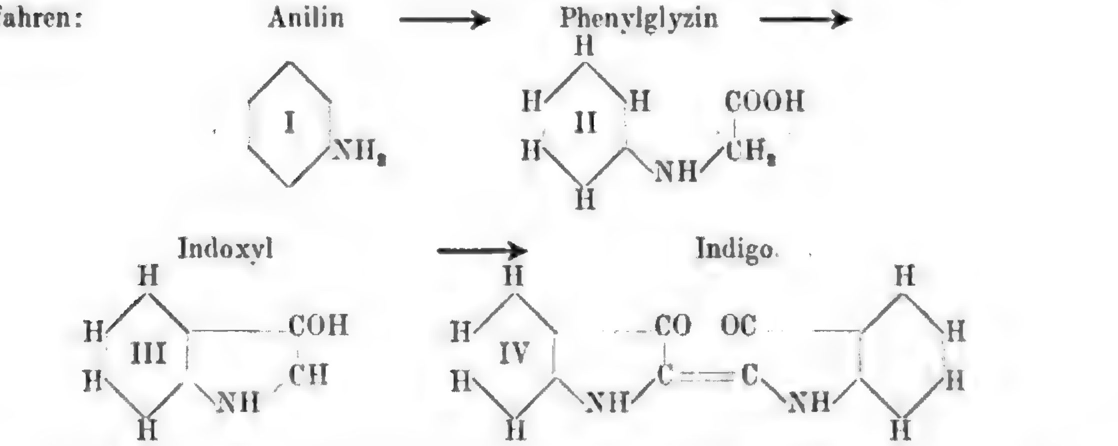
b. 

in der Lösung der Schmelze Verknüpfung von 1 Mol. Indoxyl-Na und 1 Mol. Isatin-Na zu Indirubin.

Beim Verküpen verwandelt sich übrigens die Hauptmenge des Indirubins in das isomere Indigblau auf folgende Weise: durch die reduzierende Küpe entsteht aus Indirubin I erst Leukindirubin II, dann durch Spaltung je 2 Mol. Indoxyl III und daraus dann durch die nach der Verküpung folgende Oxydation an der Luft nicht wieder Indirubin, sondern Indigblau IV:



2. Verfahren:



Weshalb dieses ältere und einfachere Verfahren 2 zunächst mit 1 nicht in Wettbewerb treten konnte, lag begründet in der geringen Ausbeute an Indoxyl bei der Alkalischmelze des Phenylglyzins. Nachdem gefunden war, daß die Schmelze möglichst wasserfrei sein muß und daß dies trotz des bei der Reaktion erzeugten Wassers durch Zusatz von Natriumamid $NaNH_2$ erreichbar ist, fiel dieser Uebelstand weg; anscheinend arbeiten jetzt beide Verfahren gleich gut und der natürliche Indigo ist durch den künstlichen in großem Umfange ersetzt.

Für Wolle und für Baumwolle ist die

Digitized by Google

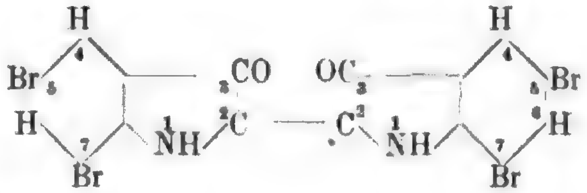
Indigoküpenfärberei von größter Bedeutung; sie ist schon seit den ältesten geschichtlichen Zeiten bekannt und Indigo war von jeher einer der wichtigsten Farbstoffe. Auch für den Baumwolldruck (Kattundruck) hat der Indigo seit einigen Jahren erhöhte Verwendung gefunden. Die Echtheitseigenschaften sind fast in jeder Hinsicht gut, werden aber von einigen anderen synthetisch hergestellten Gliedern der Indigofamilie noch übertroffen.

Indigkarmin ist das Na-Salz der durch Sulfonierung von Indigblau gewonnenen Indigblaudisulfonsäure $C_{16}H_8N_2O_2(SO_3H)_2$; es löst sich leicht in Wasser, färbt Seide und Wolle direkt an und findet in der Wollfärberei trotz seiner mäßigen Lichtechtheit ziemlich starke Verwendung. Die erzielten Farbentöne sind reiner blau als die etwas stumpfen, aber echten Töne der Küpenfärbung.

In den letzten Jahren sind eine lange Reihe von synthetischen Indigofarbstoffen in den Handel gekommen, die fast alle Farben des Spektrums umfassen und sich, aus der Küpe gefärbt, durch hervorragende Echtheitseigenschaften auszeichnen. Man übersieht das verwickelte Gebiet leicht, wenn man es einteilt in symmetrisch nach dem Indigotypus gebaute und in unsymmetrische, nach dem Indirubintypus gebaute Farbstoffe; die 2-wertigen NH-Gruppen können eine oder beide durch 2-wertige Atome oder Atomgruppen, z. B. durch Schwefel ersetzt sein.

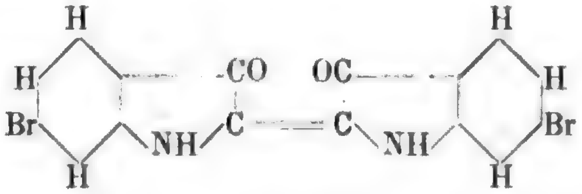
a) Nach dem Indigblautypus gebaute Farbstoffe:

10. Cibablau. (5.7.5.7) Tetrabromindigo



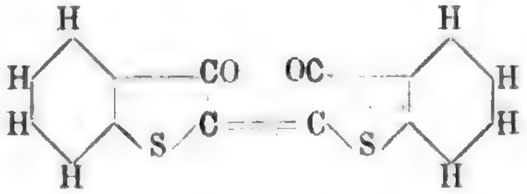
liefert ein sehr reines, leuchtendes Blau.

11. (6.6)-Dibromindigo



synthetisch hergestellt, ist identisch mit dem aus Purpurschnecken gewonnenen Purpur der Alten; er färbt ein stumpfes Rotviolett und ist für die heutige Färberei bedeutungslos.

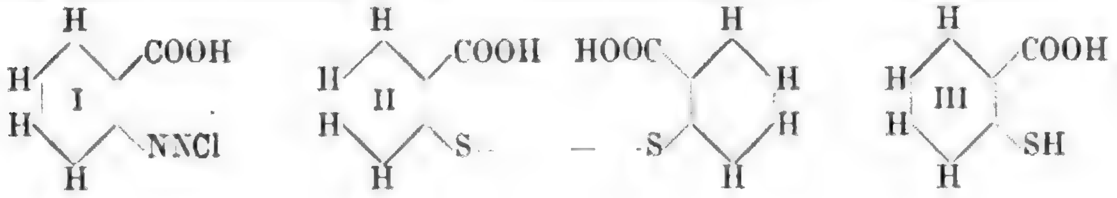
12. Thioindigorot B

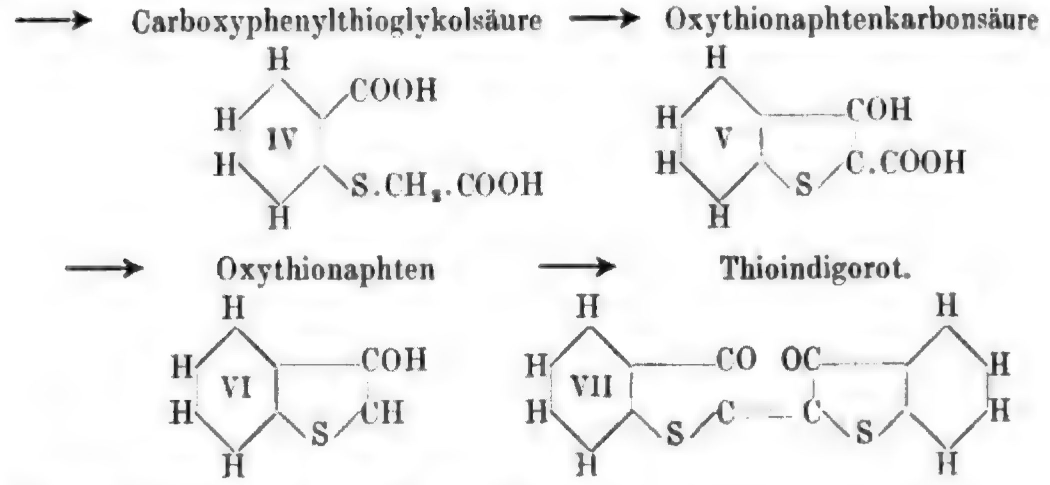


Darst.: Naphtalin ⟶ Phtalsäureanhydrid ⟶ Phtalimid ⟶ Anthranilsäure.

bis hierher stimmt der Weg mit dem zur Darstellung von Indigblau 1 überein, weiterhin ist er neu.

diazotierte Anthranilsäure ⟶ Dithiosalicylsäure ⟶ Thiosalicylsäure





Die Umwandlung von I zu II erfolgt durch Natriumdisulfid:

$$2C_6H_4\langle^{COOH}_{NNCl} + Na_2S_2 \longrightarrow C_6H_4\langle^{COOH}_{S-} \quad {}^{HOOC}_{-S}\rangle C_6H_4 + 2NaCl + 2N_2;$$

von II zu III durch Reduktion mit Fe oder Zn:

$$C_6H_4\langle^{COOH}_{S-} \quad {}^{HOOC}_{-S}\rangle C_6H_4 + 2H \longrightarrow 2C_6H_4\langle^{COOH}_{SH} \ :$$

von III zu IV durch eine Lösung von chloressigsaurem Na:

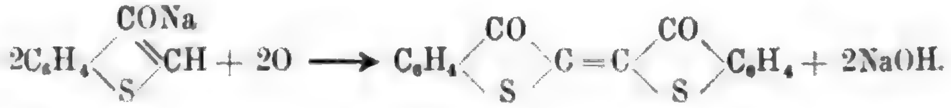
$$C_6H_4\langle^{COONa}_{SNa} + ClCH_2.COONa \longrightarrow C_6H_4\langle^{COONa}_{S.CH_2.COONa} + NaCl;$$

von IV zu V durch die Alkalischmelze:

wobei auch weiterhin die Abspaltung der Karboxylgruppe erfolgt:

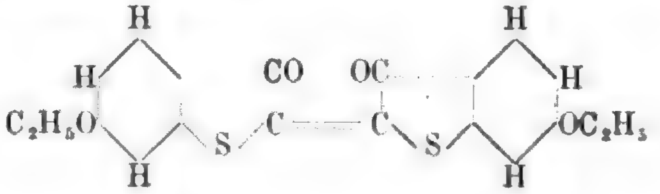
V zu VI:

VI zu VIII erfolgt durch Oxydation in der alkalischen Lösung der Schmelze:



Färbt aus der Küpe auf Baumwolle und Wolle ein stumpfes, dem Fuchsinrot ähnliches Violettrot von ganz hervorragender Echtheit. Cibabordeaux B und Cibarosa sind halogenisiertes Thioindigorot B.

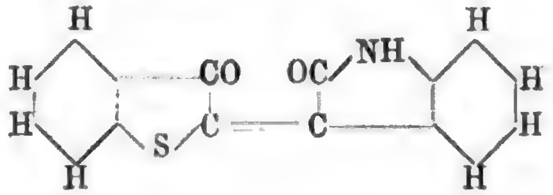
13. Helindonorange R



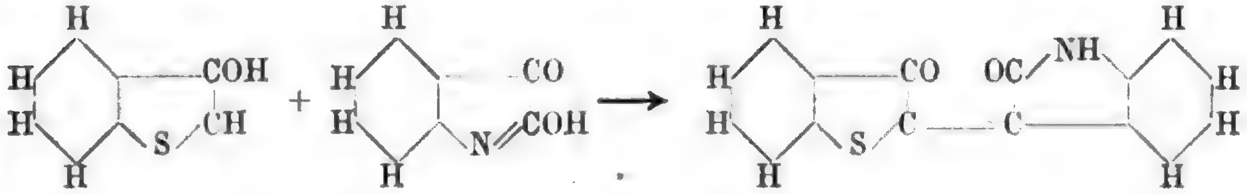
ist ein schönes echtes Orange für Baumwolle und Wolle. Die anderen Helindonfarben sind gleichfalls durch Alkoxylgruppen substituiertes Thioindigorot.

b) Nach dem Indirubintypus gebaute Farbstoffe.

14. Thioindigoscharlach R

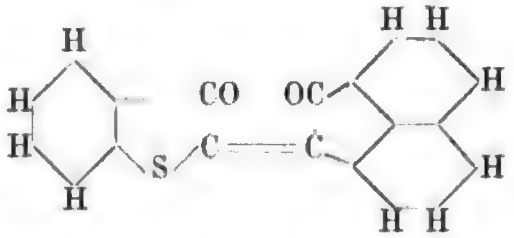


Darstellung durch kurzes Aufkochen einer wässerigen, schwach alkalischen Lösung gleichmolekularer Mengen von Oxythionaphten und Isatin:

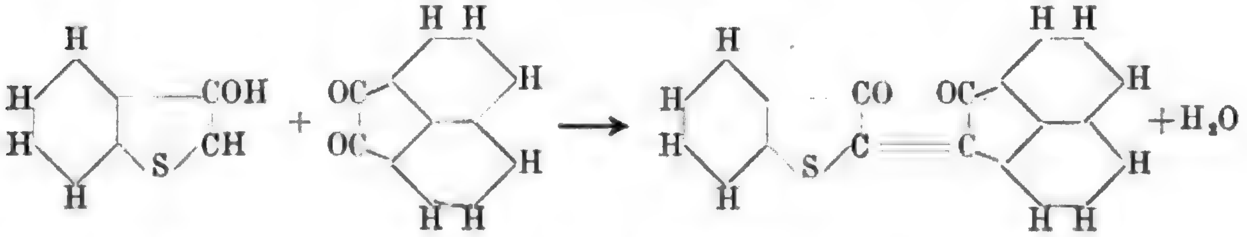


Hochrote, metallglänzende Nädelchen, unlöslich in den üblichen Lösungsmitteln. Färbt aus der farblosen Küpe Wolle und Baumwolle echt scharlachrot. Cibarot G ist Dibromthioindigoscharlach.

15. Thioindigoscharlach 2 G



entsteht durch Kondensation von Oxythionaphten mit Acenaphtenchinon:



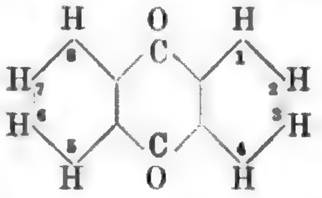
Färbt aus der Küpe Baumwolle und Wolle hervorragend echt gelbstichig scharlachrot.

IV. Chinonfarbstoffe.

Die Chinonfarbstoffe (vgl. den Artikel „Chinone") sind eine besondere Klasse von Diketonfarbstoffen, welche den Chinonkern enthalten, nämlich 2 Ketongruppen oder substituierte Ketongruppen (Ketoximgruppe $>C = NOH$, Ketonimidgruppe $>C = NH$) in o- oder p-Stellung als Glieder eines Ringes. Es gehören hierher außer einigen weniger wichtigen Farbstofffamilien die Alizarinfarbstoffe, die Oxazine, Thiazine und Azine und die lange Reihe der Triphenylmethanfarbstoffe.

a) Anthracenfarbstoffe.

Alle Anthracenfarbstoffe stammen ab von dem Ringdiketon Anthrachinon

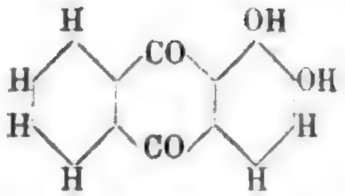


(vgl. den Artikel „Anthracengruppe") und haben als Auxochrome —OH- oder —NH_2-Gruppen; wertvolle Farbstoffe dieser

Digitized by Google

Klasse besitzen stest 2 Auxochrome in o-Stellung (Alizarinstellung [1,2]). Nach ihrem wichtigsten und am längsten bekannten Vertreter, dem Alizarin, heißen die Anthracenfarbstoffe auch Alizarinfarbstoffe. Die große Mehrheit dieser Verbindungen wird durch Substitution des zugrundeliegenden, aus Steinkohlenteer gewonnenen Kohlenwasserstoffs Anthracen $C_6H_4<\substack{CH\\CH}>C_6H_4$, nur eine Minderheit durch synthetischen Aufbau des Anthracenkernes dargestellt. Von den aus Pflanzen gewinnbaren Farbstoffen dieser Klasse hat heute keiner mehr eine nennenswerte Bedeutung; entweder sind sie durch identische künstliche Farbstoffe ersetzt oder verdrängt durch ähnlich färbende Teerfarben anderer Art. Die meisten Anthracenfarbstoffe werden als Beizenfarbstoffe verwendet, nur wenige zu direkter Färbung und nur eine kleine Familie, die Indanthrene, als Küpenfarbstoffe. Die erzielbaren Farbentöne umfassen außer reinem Grün sonst so ziemlich alle Farben des Spektrums und die meisten Färbungen zeichnen sich durch vorzügliche Echtheitseigenschaften aus.

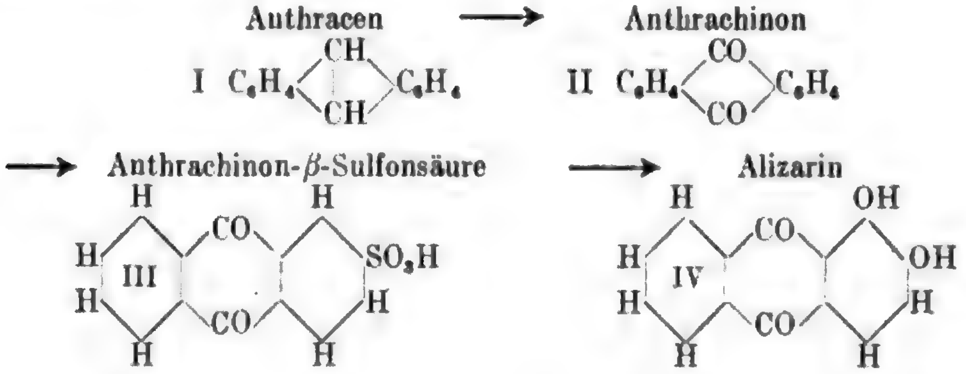
1a. Alizarin



Alizarin ist der Hauptbestandteil des schon im Altertum bekannten und benutzten Farbstoffs der Krappwurzel von Rubia tinctorum; es kommt darin vor als Ruberythrinsäure, welche durch Einwirkung von Säuren und Alkalien oder durch Gärung in Alizarin und Glukose (Traubenzucker) gespalten wird:

$$C_{26}H_{28}O_{14} + 2H_2O \longrightarrow 2C_6H_{12}O_6 + C_6H_4<\substack{CO\\CO}>C_6H_2(OH)_2.$$

Vor 4 Jahrzehnten hat die fabrikmäßige synthetische Darstellung des Alizarins den Krapp zu verdrängen begonnen und binnen wenigen Jahren den Anbau des Krapps vernichtet, so daß große Strecken Ackerboden, namentlich in Südfrankreich, für andere Kulturpflanzen verfügbar wurden. Die Herstellung des Alizarins nimmt folgenden Weg:



Das aus Steinkohlenteeröl gewonnene Anthracen wird durch Chromsäure zu Anthrachinon oxydiert, I → II:

$$C_6H_4<\substack{CH\\CH}>C_6H_4 + 3O \longrightarrow H_2O + C_6H_4<\substack{CO\\CO}>C_6H_4$$

Anthrachinon wird durch Erhitzen mit rauchender Schwefelsäure sulfoniert, II → III:

$$C_6H_4<\substack{CO\\CO}>C_6H_4 + SO_3 \longrightarrow C_6H_4<\substack{CO\\CO}>C_6H_3.SO_3H$$

III → IV erfolgt durch Alkalischmelze oder durch Erhitzen mit Natronlauge unter Druck auf 170°:

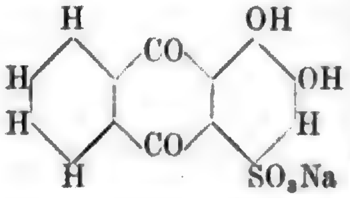
$$C_6H_4<\substack{CO\\CO}>C_6H_3.SO_3Na + 3NaOH \longrightarrow C_6H_4<\substack{CO\\CO}>C_6H_2<\substack{ONa\\ONa} + Na_2SO_3 + 2H$$

hierbei wird der Wasserstoff nicht frei, sondern reduziert einen Teil des Alizarins. Um diese Störung zu vermeiden, setzt man der Natronlauge als Oxydationsmittel Kalium-

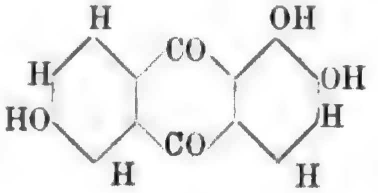
Digitized by Google

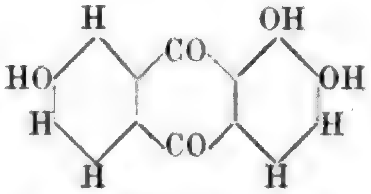
chlorat $KClO_3$ zu. Der Verlauf der Reaktion ist ungewöhnlich, da nicht bloß die Sulfongruppe durch —ONa ersetzt wird, sondern auch noch ein benachbartes H-Atom. Aus dem Na-Salz wird das freie Alizarin durch Ansäuern ausgefällt.

Alizarin ist ein rotgelbes, bei 290° schmelzendes Pulver, das in gelbroten Nadeln sublimiert, sich in Wasser wenig löst, mit Alkalien blauviolette, leicht lösliche, mit den meisten anderen Metallen unlösliche, verschieden gefärbte Salze, Lacke, bildet. In der Färberei findet der rote Aluminiumlack, der schwarzviolette Eisen- und der braunviolette Chromlack Anwendung. Ein Eingehen auf die oft sehr verwickelten Beizenfärbereiverfahren würde über den Rahmen dieser Abhandlung hinausgehen. Zum Färben und Bedrucken von Baumwolle und Leinen in Rosatönen dient der Aluminiumlack, in tieferen roten und scharlachroten Tönen ein Rizinusölsäure enthaltender Aluminiumcalciumlack (Türkischrotfärberei), in braunvioletten Tönen der Chromlack und in gebrochen violetten bis fast schwarzen Tönen der Eisenlack. Zum Färben und Bedrucken von Wolle werden hauptsächlich die roten Aluminiumlacke und die braunvioletten Chromlacke verwendet. Alle Ausfärbungen sind sehr echt in jeder Hinsicht. Die roten Alizarinlacke (Krapplacke) sind wegen ihrer Lichtechtheit auch geschätzt und viel gebraucht als Farben in der Aquarell- und Oelmalerei sowie in der Lithographie.

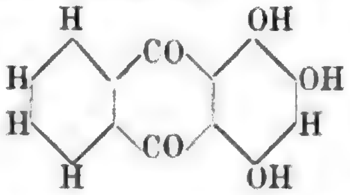
1b. Alizarinrot S 

ist das Na-Salz des mit rauchender Schwefelsäure sulfonierten Alizarins und dient zum Scharlachfärben von Wolle auf Aluminiumbeize.

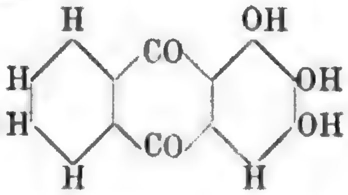
1c. Flavopurpurin  u.

1d. Isopurpurin, Anthrapurpurin 

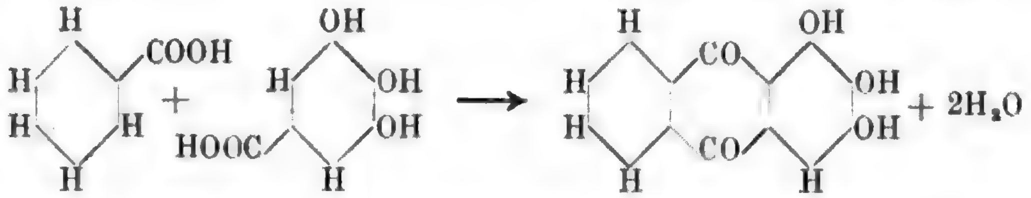
entstehen bei der Alkalischmelze aus den Anthrachinondisulfonsäuren α und β, die bei stärkerer Sulfonierung des Anthrachinons sich bilden. Beide isomeren Trioxyanthrachinone liefern auf Wolle und Baumwolle mit Aluminiumbeize gelbstichigeres Scharlach als Alizarin. Sie sind in vielen Alizarinmarken, die zu Scharlachfärbungen dienen, absichtlich enthalten.

2. Purpurin 

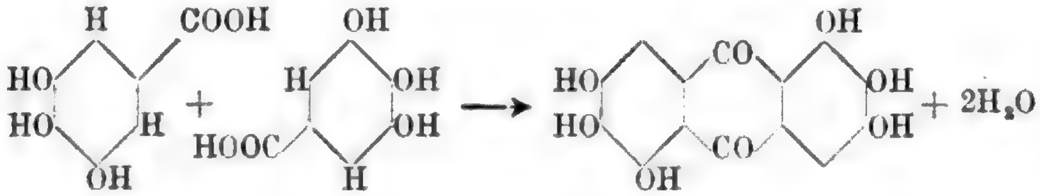
Ist neben Alizarin im natürlichen Krappfarbstoff enthalten und wird durch Oxydation von Alizarin dargestellt. Sein scharlachroter Aluminiumlack und tiefvioletter Chromlack finden beschränkte Verwendung im Woll- und Baumwolldruck.

3. Anthragallol, Anthracenbraun 

Darstellung: Durch Erhitzen eines Gemisches von Benzoesäure und Gallussäure mit konzentrierter Schwefelsäure:

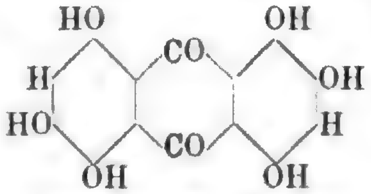


Zum Färben und Drucken von Wolle und Baumwolle viel benützt wegen der satten Braunfärbungen, die es auf Aluminium- und auf Chrombeize erzeugt. Da bei der Synthese des Anthragallols gleichzeitig die Umsetzung



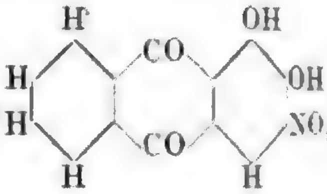
eintritt, also ein Hexaoxyanthrachinon, das Rufigallol, sich bildet, so ist dieses dem technischen Anthragallol beigemengt. Der färberischen Verwendung tut dies keinen Eintrag, weil auch das Rufigallol ein brauner Beizenfarbstoff ist. Ein isomeres, als Dipurpurin aufzufassendes Hexaoxyanthrachinon ist das

4. Anthracenblau



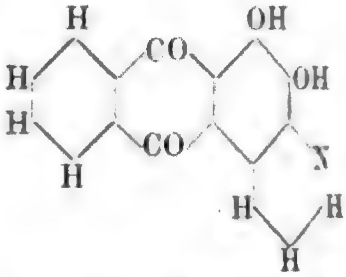
Darstellung: Erhitzen von 1,5-Dinitroanthrachinon $NO_2C_6H_3\left\langle \begin{matrix} CO \\ CO \end{matrix} \right\rangle C_6H_3NO_2$ mit rauchender Schwefelsäure. Es liefert beim Färben und Drucken von Wolle und Baumwolle ein schönes, tiefes, sehr echtes Blau auf Chrombeize.

5. Nitroalizarin, Alizarinorange

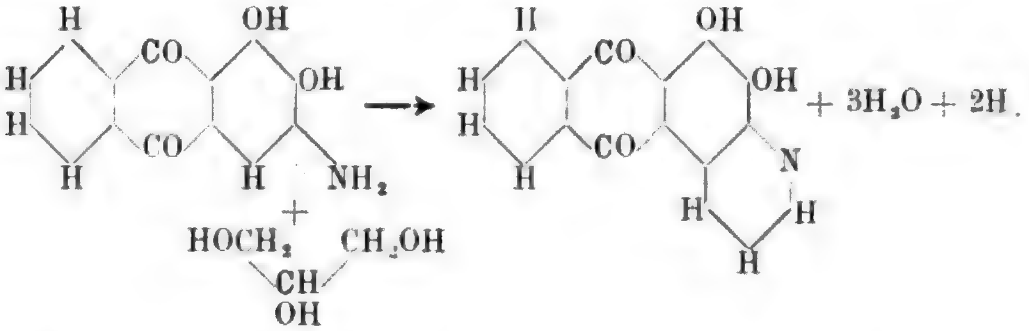


Darstellung: Durch Nitrieren von Alizarin. Zum Färben und Drucken von Wolle und Baumwolle; gibt auf Aluminiumbeize ein bräunliches Orange, auf Chrombeize ein Rotviolett, beide echt.

6. Alizarinblau

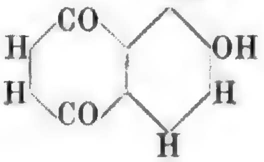


Darstellung: Nitroalizarin (Nr. 5) wird zu Aminoalizarin reduziert und dieses mit Glyzerin und Schwefelsäure unter Zusatz von Nitrobenzol erhitzt; dabei erfolgt dann Bildung eines Pyridinringes „Alizarinchinolin" analog wie aus Anilin Chinolin sich bildet:



Das beigefügte Nitrobenzol oxydiert den bei der Synthese frei werdenden Wasserstoff. Beim Färben und Drucken von Wolle und Baumwolle erzeugt das Alizarinblau ein tiefes Indigoblau auf Chrombeize und hatte als Indigoersatz eine Verwendung, die aufgehört hat seit der technischen Darstellung von Indigblau. Einige seiner Abkömmlinge: Alizarinblau S, Alizaringrün und Alizarinindigblau werden heute mehr gebraucht als das Alizarinblau.

7. Alizarinschwarz, Naphtazarin



ist das Analogon des Alizarins in der Naphtalinreihe, also kein Anthracen-, sondern ein Naphtalinfarbstoff, dessen Einreihung an dieser Stelle der Analogie wegen geschieht.

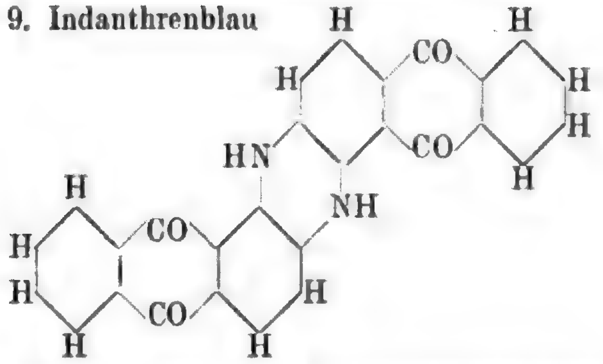
Darstellung: Ein Gemisch von Dinitronaphtalinen wird mit einer Lösung von Schwefel in konzentrierter Schwefelsäure erwärmt. Naphtazarin liefert auf chromgebeizter Wolle ein licht-, walk- und säureechtes Schwarz.

8. Alkannin ist ein roter Anthrachinonfarbstoff nicht näher erforschter Struktur, der in der Alkannawurzel vorkommt und heute nur noch zum Färben von Genußmitteln gebraucht wird.

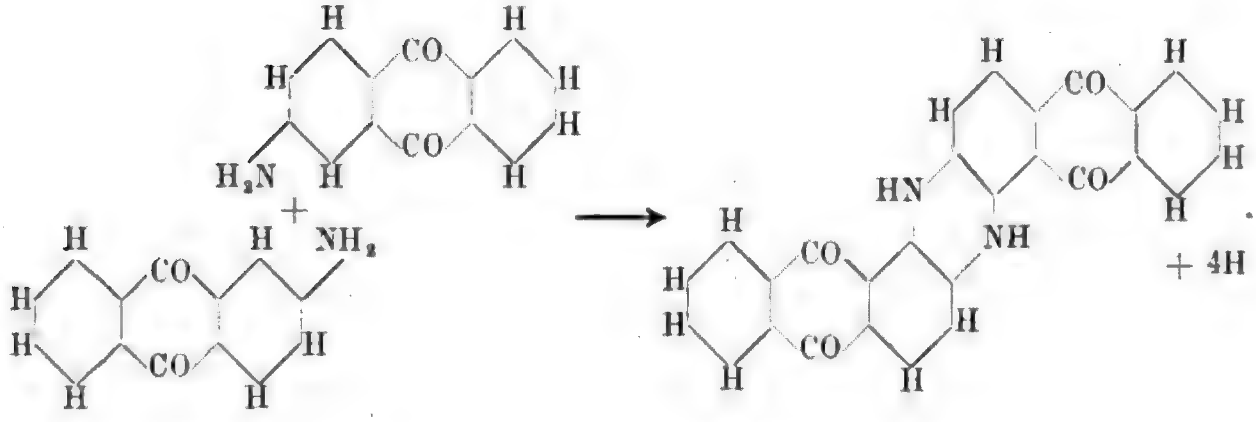
Indanthrene. Mit dem Namen Indanthrene faßt man eine Familie von Anthracenfarbstoffen zusammen, die das Gemeinsame haben, daß sie aus Aminoanthrachinon unter Verknüpfung von zwei und mehr Anthrachinonresten entstehen. Alle sind hervorragend echte Küpenfarbstoffe, die für völlig widerstandsfähige Baumwollfärbungen sehr große Bedeutung besitzen; Farben aus allen Bezirken des Spektrums sind unter ihnen vertreten, nur kein reines, klares Grün. Hier können nur 2, verhältnismäßig einfache Vertreter besprochen werden, Indanthrenblau und Indanthrengelb.

Digitized by Google

9. Indanthrenblau

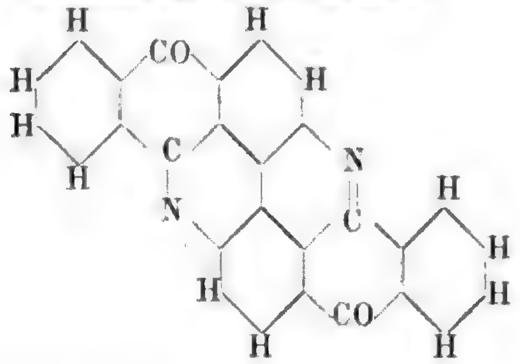


Darstellung: Aus β-Aminoanthrachinon in der Alkalischmelze unter Zusatz von Kalisalpeter.



Indanthrenblau bildet durch alkalische Reduktion eine blaue Küpe und der auf dem Gewebe durch Oxydation an der Luft entstehende Farbstoff ist gleichfalls ein Blau von reinem, tiefem Ton.

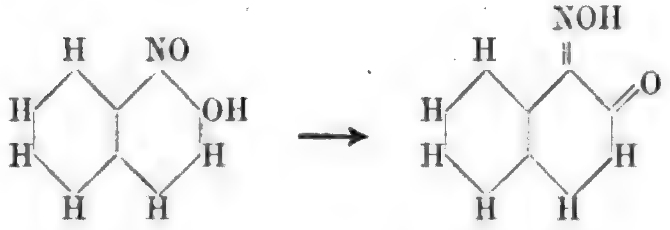
10. Indanthrengelb, Flavanthren



Indanthrengelb entsteht gleichfalls aus β-Aminoanthra- chinon in der Alkalischmelze und zwar bei höherer Temperatur. Die Küpe ist gleichfalls blau und bildet an der Luft den gelben Farbstoff.

b) Chinonoximfarbstoffe.

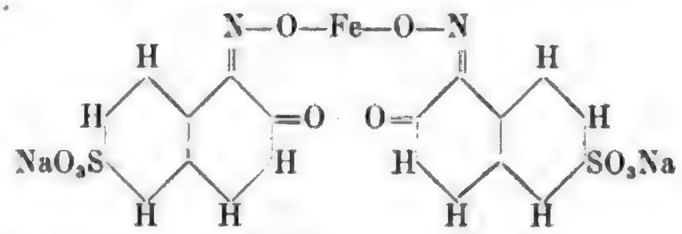
Durch Einwirkung von salpetriger Säure auf Phenole erhält man im allgemeinen nicht die unbeständigen Nitrosophenole, sondern die isomeren Chinonoxime:



Der chromophore Chinonoximring übernimmt zugleich die Rolle des Auxochroms, da die Oximgruppe Salze mit Basen bildet wie ein Phenol. Die Salze mit Al, Fe, Cr sind unlöslich und stark gefärbt, somit können die Chinonoxime als Beizenfarbstoffe dienen. Einige Vertreter haben auch tatsächlich eine beschränkte Verwendung, z. B. das oben

Digitized by Google

angeschriebene 2-Naphtochinon-1-oxim als Gambin G, welches auf Eisenbeize dunkel olivgrün, auf Chrombeize schwarzbraun färbt. Eine Sulfonsäure dieser Verbindung ist das Naphtolgrün B

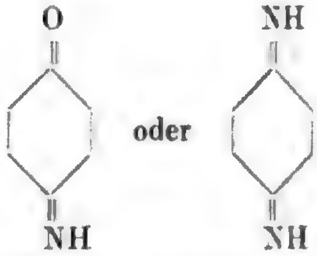


gewonnen durch Behandlung der β-Naphtolsulfonsäure-Schäffer mit salpetriger Säure und nachherige Salzbildung; das Eisen ist darin durch die üblichen Reagentien nicht nachweisbar, also nicht als Ion vorhanden. Die tiefgrüne Lösung färbt Wolle direkt wasch- und lichtecht in ziemlich lebhaften grünen Tönen an. Die grünen Niederschläge, welche die Lösung mit Al- und Pb-Salzen gibt, finden in der Buntpapierfabrikation und als Anstrichfarben Verwendung.

c) Chinonimidfarbstoffe.

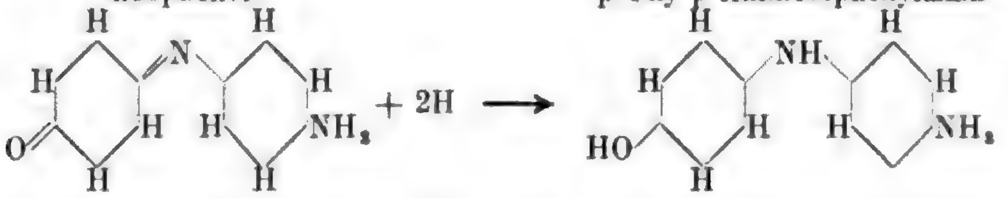
(Vgl. den Artikel „Azine".)

Als chromophore Gruppe enthalten die Chinonimidfarbstoffe den Chinonimid- oder Chinondiimidring

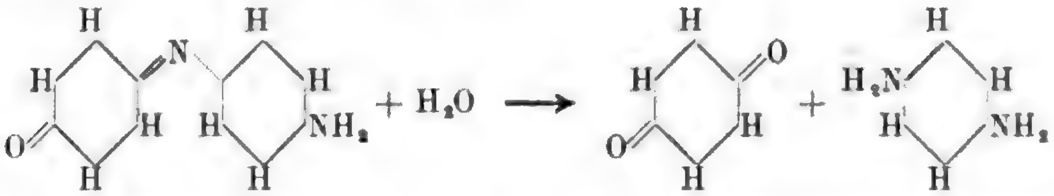


als Auxochrom die Aminogruppe. Die einfachsten Vertreter dieser Klasse, die Indophenole und Indamine, lassen sich leicht zu ihren Leukokörpern, den p-Oxy-p-Aminodiphenylaminen und p-Diaminodiphenylaminen reduzieren:

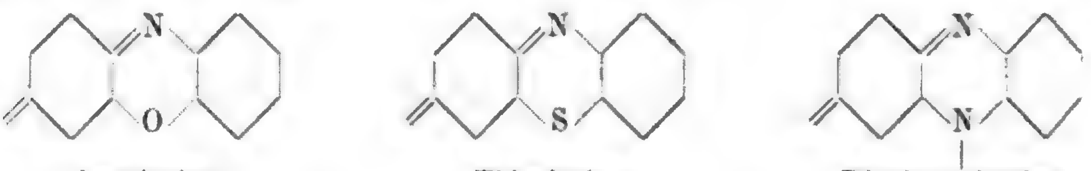
Indophenol — p-Oxy-p-Aminodiphenylamin



Sie färben sämtlich lichtecht blau, finden aber wegen ihrer Säureunechtheit kaum mehr Anwendung. Durch Säuren und meist auch durch Alkalien werden sie nämlich sehr leicht zerstört unter Spaltung in Chinon und Amin:



Dieser Uebelstand fällt weg, wenn der Chinonimidring Glied eines heterozyklischen Ringes und dadurch beständig wird; man hat dann widerstandsfähige, heterozyklische Anthracenringe:

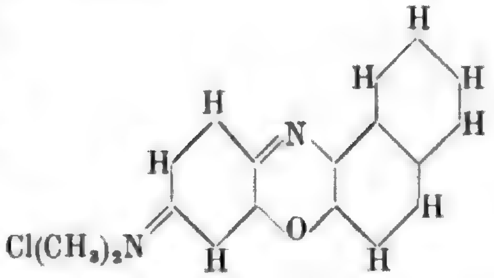


Oxazinring — Thiazinring — Diazin(Azin)ring

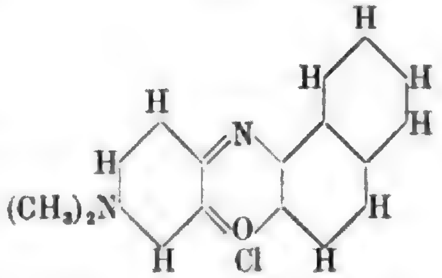
Diesen 3 Familien der Oxazine, Thiazine und Azine gehören eine Reihe wichtiger Farbstoffe an, von denen aber nur wenige Vertreter als Typen besprochen werden können.

Oxazine:

1. Neublau B oder R, Meldolablau

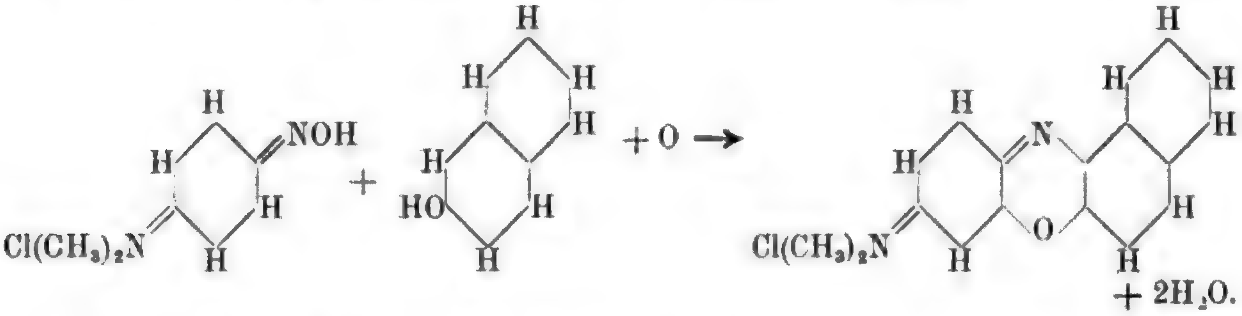


oder



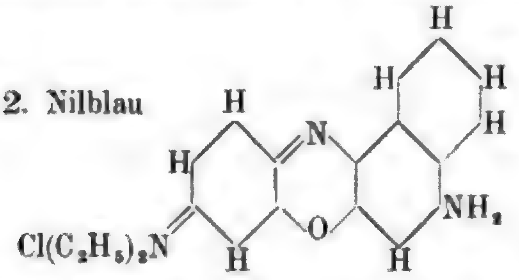
(Neuerdings wird auf Grund von Beobachtungen, die in einigen Fällen zwingend sind, durchweg für die Chinonimidfarbstoffe statt der p-chinoiden Formulierung die o-chinoide vorgezogen und demgemäß die Oxazine als Oxoniumsalze, die Thiazine als Thioniumsalze von o-Chinonimiden, nicht wie bisher als Imoniumsalze von p-Chinondiimiden aufgefaßt. Im folgenden wird meist die p-chinoide Schreibung beibehalten, die sich ja leicht in die o-chinoide übersetzen läßt).

Darstellung: Salzsaures Nitrosodimethylanilin (Chinonoximdimethylimoniumchlorid) und β-Naphtol kondensieren sich in alkoholischer Lösung schon bei Zimmerwärme:



Meldolablau bildet blauviolette, bronzeglänzende, in Wasser lösliche Kristalle, liefert ein gebrochenes, tiefes, bis zu blauschwarz gehendes Blau von guter Echtheit und dient zum Färben und Drucken von Baumwolle und Leinen auf Gerbstoffbeizen.

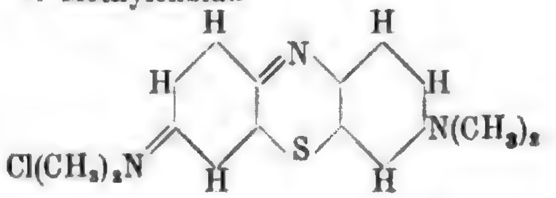
2. Nilblau



Nilblau wird ähnlich wie Meldolablau aus salzsaurem Nitrosodiäthyl-m-Aminophenol und β-Naphtylamin dargestellt und ebenso verwendet, erzeugt aber ein schöneres, rein grünstichiges Blau.

Thiazine:

3. Methylenblau



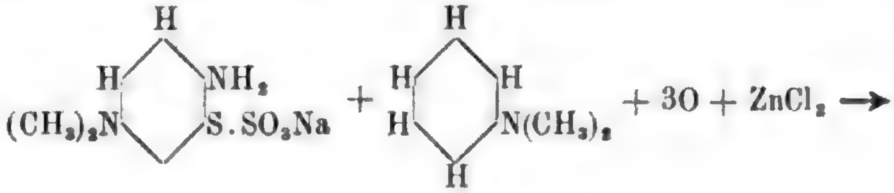
Darstellung: I. Salzsaures Nitrosodimethylanilin wird mit Zinkstaub und Salzsäure zu p-Aminodimethylanilin reduziert:

$$Cl(CH_3)_2N = C_6H_4 = NOH + 4H = HCl(CH_3)_2NC_6H_4NH_2 + H_2O.$$

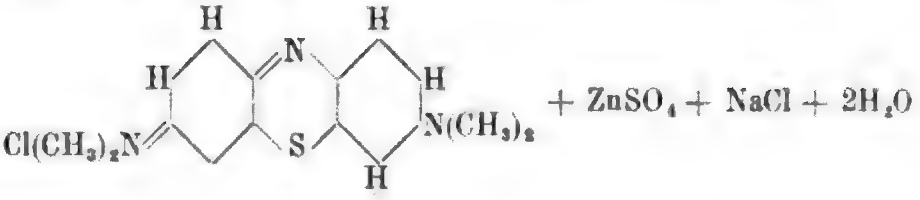
II. Die neutralisierte Lösung wird mit thioschwefelsaurem Na und $K_2Cr_2O_7$ versetzt und dadurch p-aminodimethylanilinthiosulfonsaures Na gewonnen:

$$HCl(CH_3)_2NC_6H_4NH_2 + Na_2SSO_3 + O \longrightarrow (CH_3)_2NC_6H_3\begin{matrix} NH_2 \\ S.SO_3Na \end{matrix} + NaCl + H_2O$$

III. Zur neutralen Lösung wird erst Dimethylanilin gegeben und es wird dann wiederum mit $K_2Cr_2O_7$ oxydiert:



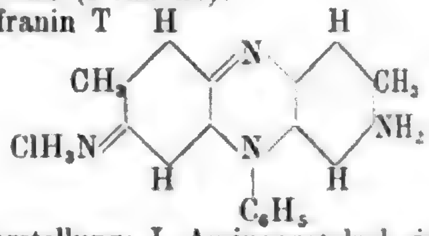
Digitized by Google



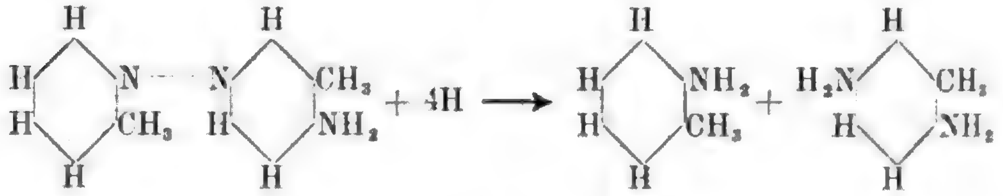
Im Handel kommt meistens das Chlorzinkdoppelsalz des Methylenblaus vor als braunes, metallglänzendes Kristallpulver, das sich in Wasser leicht mit rein blauer Farbe löst. Auf Baumwolle, die mit Tannin gebeizt ist, erzeugt Methylenblau ein schönes, ziemlich echtes Blau und wird zum Färben und Drucken sehr viel verwendet.

Azine (Diazine):

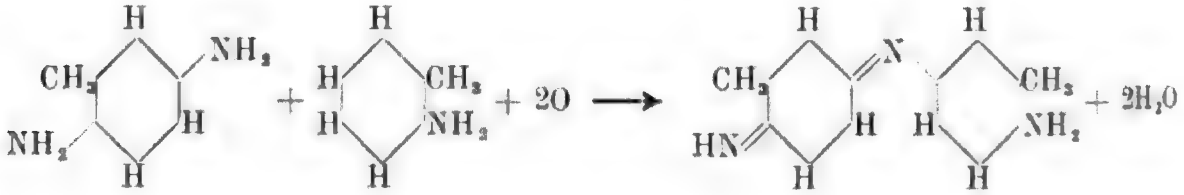
4. Safranin T



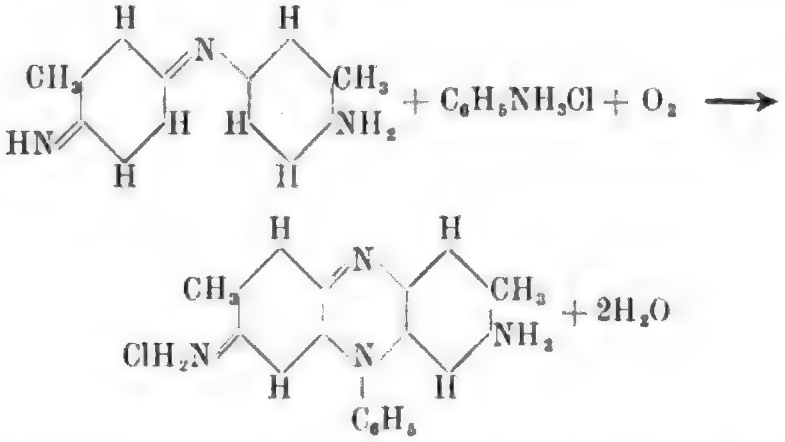
Darstellung: I. Aminoazotoluol wird mit Zinkstaub und Salzsäure reduziert:



II. Die neutralisierte Mischung aus o-Toluidin und p-Toluylendiamin wird mittels $Na_2Cr_2O_7$ zum Ditolylindamin oxydiert:



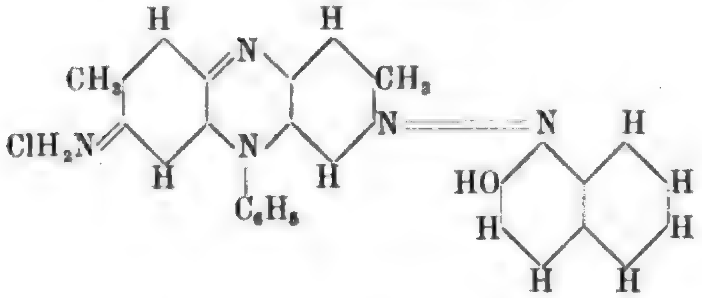
III. Hierauf wird sogleich eine Lösung von salzsaurem Anilin zugegeben und dann einige Stunden gekocht, wodurch unter Oxydation durch die Luft Azinringschließung erfolgt:



Safranin T ist im Handel als rotbraunes, in Wasser nicht sehr leicht lösliches Pulver. Es hat sehr starke Verwendung zum Färben und Drucken von Baumwolle und Leinen auf Tanninbeize; auch zum Färben von Firnissen wird es gebraucht. Die blaustichig roten, fuchsinähnlichen Färbungen, welche es liefert, sind zwar nicht hervorragend echt, aber immerhin echter als die mit Fuchsin erzeugten.

Digitized by Google

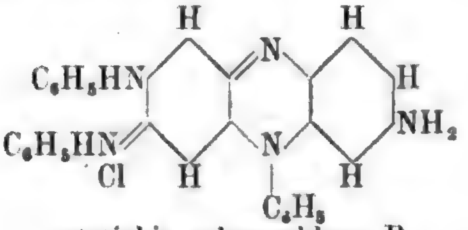
5. Indoinblau R, Janusblau



Dieser Azoazinfarbstoff wird dargestellt durch Kuppeln von diazotiertem Safranin mit β-Naphtol und wird verwendet zum Färben von Baumwolle und Leinen auf Gerbstoffbeizen; er färbt tiefblau mit guten Echtheitseigenschaften.

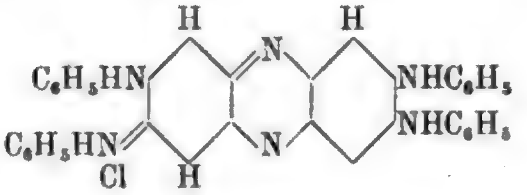
Ein Homologes des Safranins ist das **Mauvein**, der älteste Farbstoff dieser Art; er liefert Violett- und Lilatöne, wird seit langen Jahren als Druckfarbe für englische Brief- und Stempelmarken benutzt und heute ist dies wohl die einzige Verwendung, die ihm geblieben ist.

6. Spritindulin, Indulin R und B, Echtblau R und B, sind Mischungen von zwei ähnlichen Farbstoffen



rotstichig schwarzblau, R

und



grünstichig schwarzblau, B

Die Marke R enthält überwiegend das einfachere, B überwiegend das höhere Homologe, beide enthalten aber noch kompliziertere Verbindungen. Sie werden dargestellt durch Erhitzen von Aminoazobenzol mit Anilin und salzsaurem Anilin, sind in Wasser wenig oder kaum löslich und dienen zum Färben von Spritlacken und zum Bedrucken von Baumwolle. Indulin, wasserlöslich, Echtblau R und B wasserlöslich, Nigrosin, wasserlöslich sind Na-Salze von Sulfonsäuren der obigen Induline und werden zur direkten Färbung von Wolle und Seide in echten schwarzblauen Tönen sowie im Wolldruck benützt.

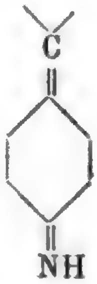
7. Anilinschwarz.

Dieser unlösliche schwarze Farbstoff ist vermutlich eine hochmolekulare indulinartige Verbindung, die aus Anilinsalzen durch Oxydation mit Chromsäure oder mit Kaliumchlorat in Gegenwart von Kupferverbindungen als katalytischen O-Ueberträgern dargestellt wird. Es findet in der Baumwollfärberei und -druckerei eine ausgedehnte Verwendung, für Wolle nur eine untergeordnete und wird stets auf der Faser erzeugt. Die Färbungen sind sehr echt.

d) Methylenchinonfarbstoffe.

Methylenchinonfarbstoffe sind gekennzeichnet durch den chromophoren Methylenchinonring

oder Methylenchinoniminring



und enthalten als Auxochrome Hydroxyl- oder Aminogruppen. Sie umfassen 1. die Triphenylmethan- und 2. die Akridinfarbstoffe.

A. Triphenylmethanfarbstoffe.

Die Triphenylmethanfarbstoffe sind die eigentlichen „Anilinfarbstoffe". Viele von ihnen zeichnen sich durch grelle Färbungen von ungewöhnlicher Leuchtkraft, durch auffällige Ausgiebigkeit und ungenügende Echtheit aus und sie meint der Laie, wenn er die künstlichen Farbstoffe rundweg schreiend und unkünstlerisch, billig, schlecht und unecht nennt.

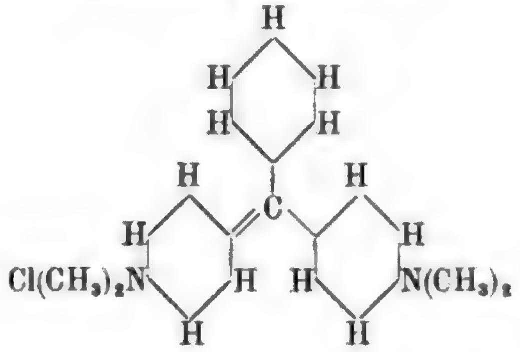
Die praktisch wichtigen Triphenylmethanfarbstoffe leiten sich ab: vom Diaminodiphenylmethan: Malachitgrünfamilie; vom Triaminotriphenylmethan: Fuchsinfamilie; von der Triphenylmethan-o-karbonsäure: Phtaleine.

Kein Triphenylmethanfarbstoff wird aus

einem Kohlenwasserstoff der Triphenylmethanreihe dargestellt, vielmehr wird der Triphenylmethankern stets synthetisch aufgebaut aus Abkömmlingen einfacherer aromatischer Kohlenwasserstoffe.

Malachitgrünfamilie:

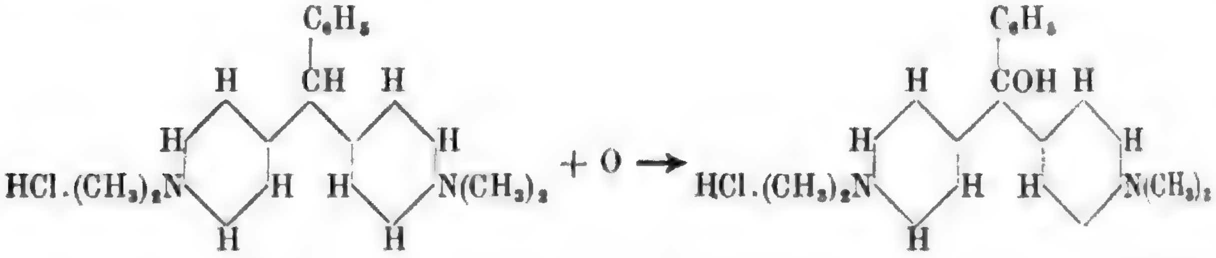
1. Malachitgrün, Bittermandelölgrün.



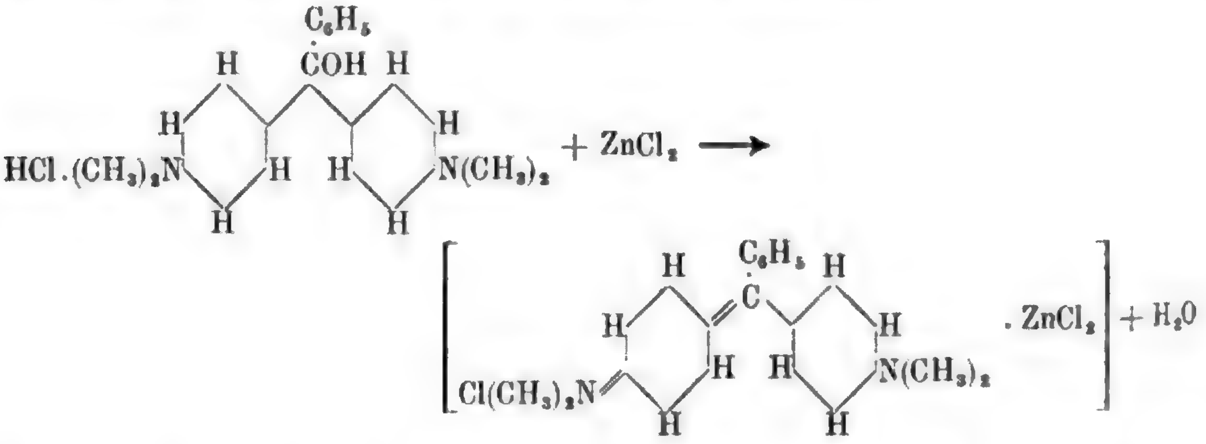
Darstellung: I. Benzaldehyd (Bittermandelöl) und Dimethylanilin werden durch Erhitzen mit Chlorzink kondensiert zum Leukomalachitgrün:

$$C_6H_5.C\begin{matrix}\nearrow O\\ \searrow H\end{matrix} + 2C_6H_5N(CH_3)_2 \longrightarrow C_6H_5.CH\begin{matrix}\nearrow C_6H_4N(CH_3)_2\\ \searrow C_6H_4N(CH_3)_2\end{matrix} + H_2O.$$

II. Leukomalachitgrün (Tetramethyldiaminotriphenylmethan) wird in salzsaurer Lösung mit Bleisuperoxyd zu Tetramethyldiaminotriphenylkarbinol oxydiert:



III. Durch Zusatz von Chlorzink und Aussalzen mit Kochsalz wird der aus dem Karbinol durch Wasserabspaltung entstandene Farbstoff ausgefällt:

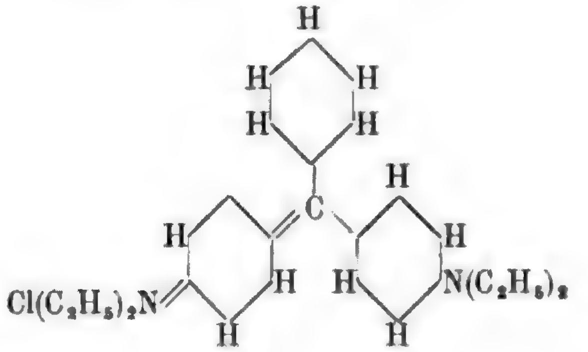


Das Chlorzinkdoppelsalz bildet messingglänzende Kristalle, ebenso das auch im Handel befindliche Oxalat; beide Salze sind in Wasser gut löslich, das Pikrat jedoch nur in Sprit und dient deshalb zum Färben von Firnissen. Malachitgrün färbt Seide, Wolle und Jute direkt, Baumwolle und Leinen auf Tanninbeize und besitzt eine ungewöhnlich große Färbekraft; es findet starke Verwendung in Färberei und Druckerei, obgleich die grell blaugrünen Färbungen wenig lichtecht und weder säure- noch alkaliecht sind. Auf Tonerde, Schwerspat usw. niedergeschlagene Gerbstofflacke dienen als grüne Anstrich-

Digitized by Google

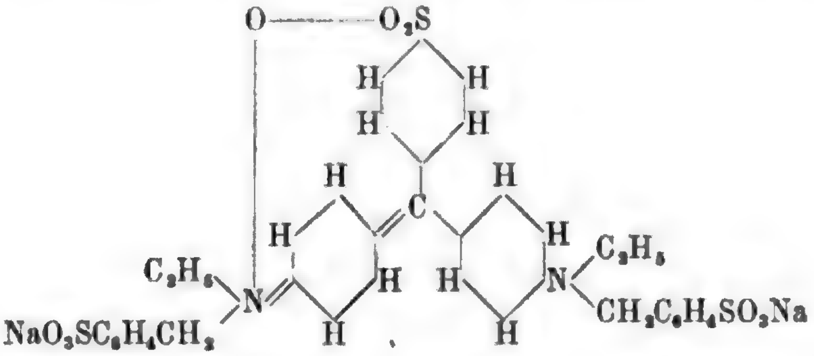
farben, ferner im Buchdruck, Steindruck und Tapetendruck; auch hierfür gilt das Wort: billig und schlecht. Wässerige Lösungen von Malachitgrün werden als grüne Tinte und Stempelfarbe verwendet.

2. Brillantgrün,
Malachitgrün G

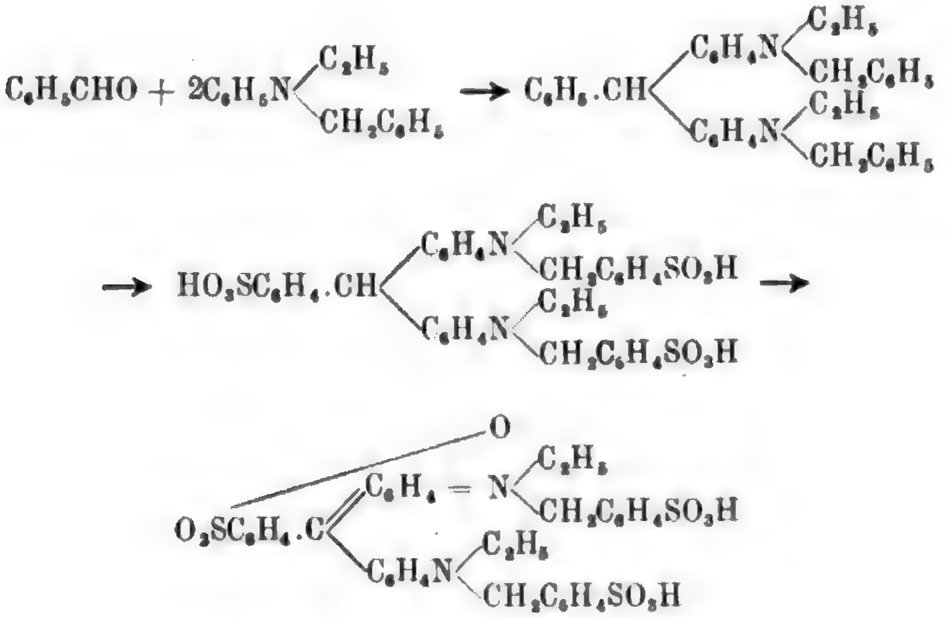


Brillantgrün wird aus Diäthylanilin an Stelle von Dimethylanilin in ähnlicher Weise dargestellt, wie Malachitgrün, hat ähnliche Eigenschaften und Verwendung und unterscheidet sich nur durch einen weniger blauen Ton und durch noch mangelhaftere Lichtechtheit.

3. Lichtgrün 2G,
Säuregrün



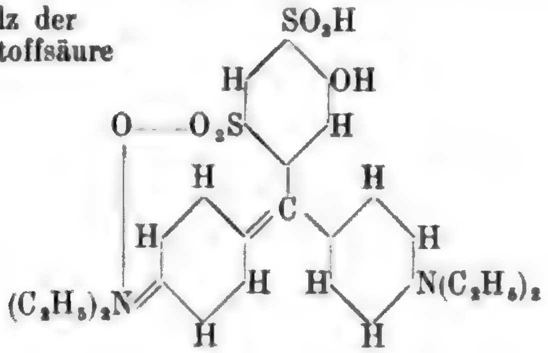
Darstellung: Durch Sulfonierung der Leukobase und nachherige Oxydation zum Farbstoff:



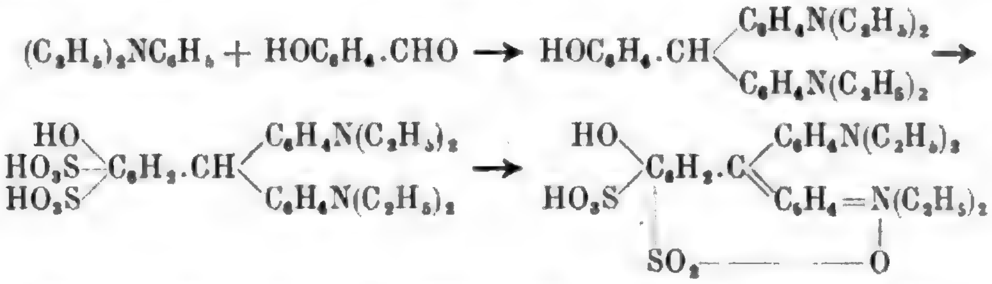
Die Verbindung färbt Wolle und Jute direkt in smaragdgrünen Tönen und ist besser licht- und säureecht als die unsulfonierten Malachitgrüne, aber ganz alkaliunecht, wird jedoch trotzdem viel gebraucht.

Digitized by Google

4. **Patentblau**, Ca-Salz der einbasischen Farbstoffsäure



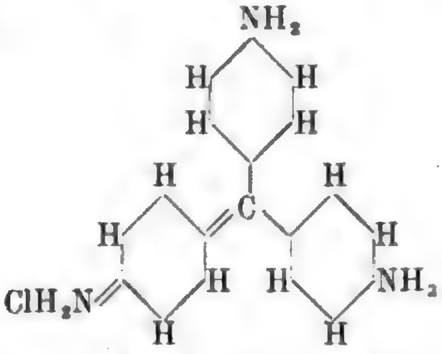
Darstellung: Die Leukobase aus Diäthylanilin und m-Oxybenzaldehyd wird sulfoniert und dann zum Farbstoff oxydiert.



Wichtiger Farbstoff zum Färben von Seide und Wolle in schönen, grünstichig blauen Tönen, säureecht, alkaliecht und ziemlich lichtecht. Schwerlösliche Metallsalze dienen in Mischung mit Tonerde oder Schwerspat als Körperfarben zum Anstreichen, zu Buch- und Steindruck und sind in dunkeln Färbungen befriedigend echt.

Fuchsinfamilie.

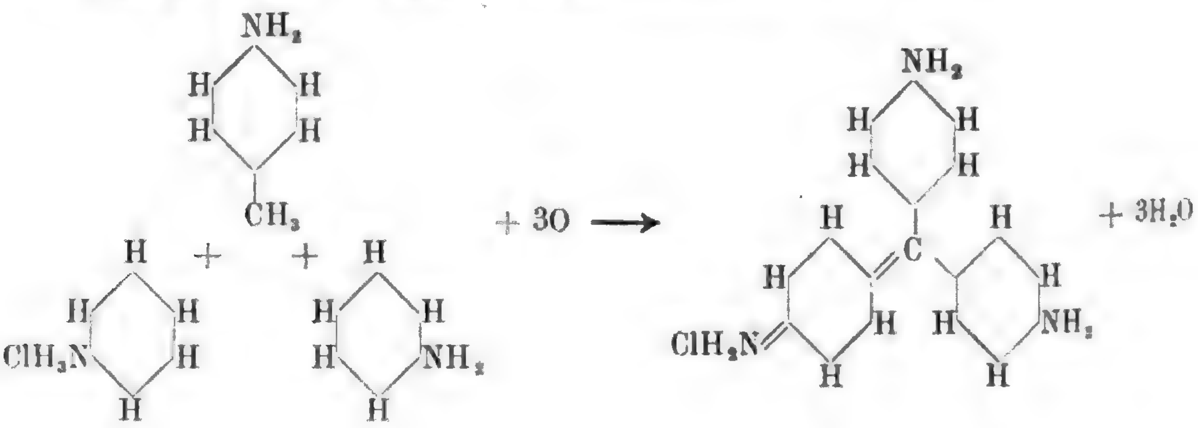
5a. **Fuchsin, Parafuchsin**



Zwei Darstellungsverfahren, ein älteres und ein neueres.

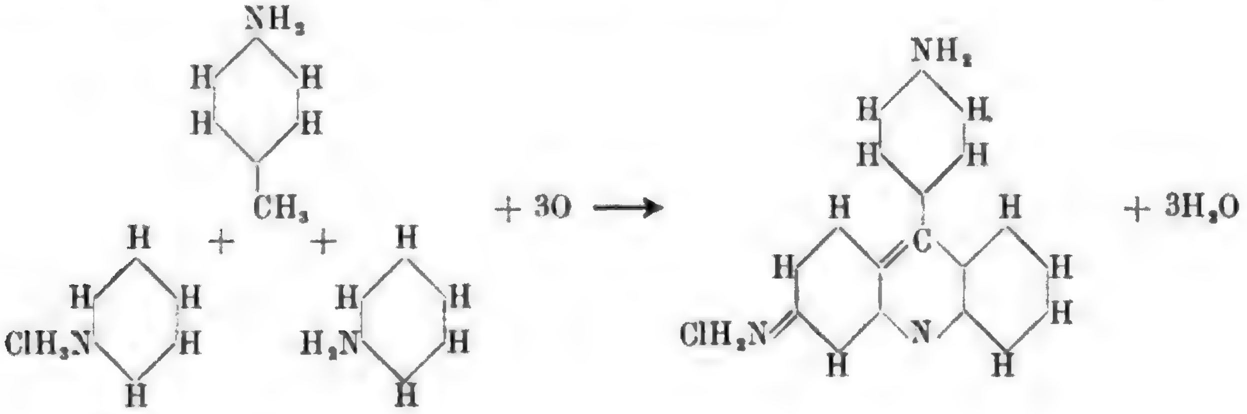
Erstes Verfahren:

Eine Mischung aus 1 Mol. p-Toluidin und 2 Mol. Anilin wird unter Zusatz von Salzsäure (weniger als zur Neutralisation nötig wäre), Nitrobenzol als Oxydationsmittel und Eisen als O-Ueberträger mehrere Stunden auf etwa 200° erhitzt, das entstandene Fuchsin mit Wasser aus der Schmelze ausgelaugt und umkristallisiert; das folgende Schema veranschaulicht den Vorgang:



Digitized by Google

Von den nebenbei eintretenden Reaktionen ist eine theoretisch und praktisch wichtig: von den beiden beteiligten Anilinmolekeln reagiert nur eines mit dem in p-Stellung befindlichen H-Atom das andere aber mit dem orthoständigen H; dadurch erfolgt gleichzeitig mit dem Aufbau des Triphenylmethankernes die Schließung eines Akridinringes, es entsteht statt Fuchsin der Akridinfarbstoff Phosphin:

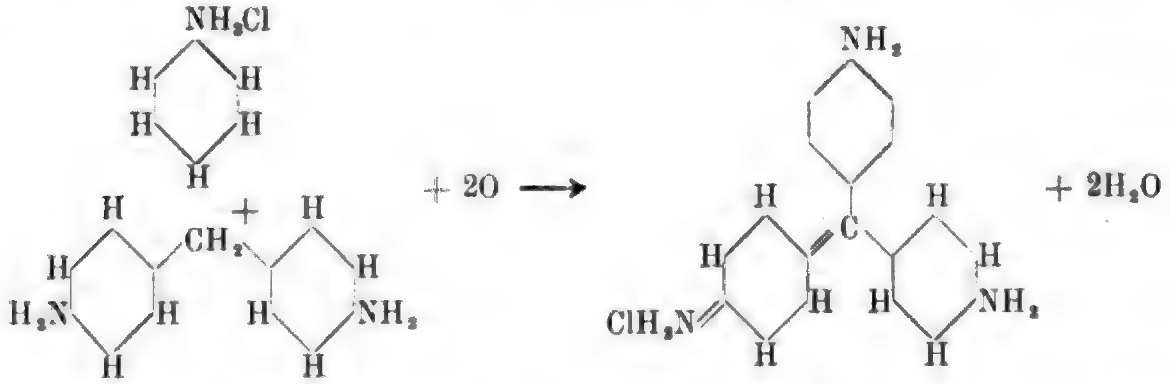


Zweites Verfahren:

I. Anilin wird mit Formaldehyd zu p-Diaminodiphenylmethan kondensiert:

$$C_6H_5NH_2 + HCHO \rightarrow C_6H_5N = CH_2 + H_2O$$
$$C_6H_5N = CH_2 + C_6H_5NH_2 \rightarrow NH_2C_6H_4.CH_2.C_6H_4NH_2$$

II. Diaminodiphenylmethan wird mit salzsaurem Anilin unter Zusatz von Nitrobenzol und Eisenchlorid verschmolzen:



Parafuchsin ist sehr farbkräftig, zieht auf Seide und Wolle direkt mit der bekannten blaustichig roten Farbe, auf Jute ebenso, auf Baumwolle aber nur unter Vermittlung einer Gerbstoffbeize mit weit blauerem und trüberen Ton. Die Färbungen sind sämtlich mangelhaft lichtecht und ganz unecht gegen Alkali und stärkere Säuren, finden aber gleichwohl ausgiebige Verwendung. Den nämlichen Mangel an Lichtechtheit zeigen auch die durch Fällung des gelösten Fuchsins mit Gerbstoffen erhaltenen Lackfarben für Buch-, Stein- und Tapetendruck.

Die Säureunechtheit des Fuchsins, des Malachitgrüns und der meisten anderen Aminotriphenylmethanfarbstoffe rührt daher, daß nur die Imoniumsalze, also die einbasischen, Farbstoffe sind, nicht aber die gelblichen Imoniumammoniumsalze, die durch verdünnte, starke Säuren entstehen:

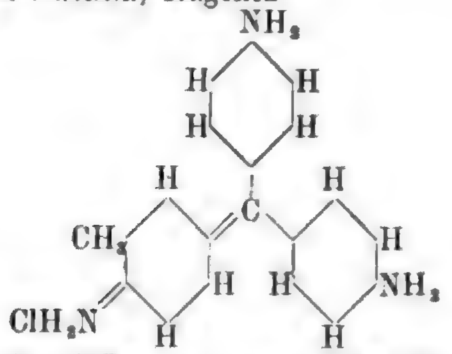
$$ClH_2N = C_6H_4 = C\begin{cases} C_6H_4NH_2 \\ C_6H_4NH_2 \end{cases};$$
Imoniumsalz, Fuchsin

$$ClH_2N = C_6H_4 = C\begin{cases} C_6H_4NH_2 \\ C_6H_4NH_2Cl \end{cases}$$
Imoniumammoniumsalz, gelblich

Fuchsin ist deshalb verwertbar als Indikator auf freie „Mineralsäure". Die Alkaliunechtheit der nämlichen Farbstoffe erklärt sich durch die Tatsache, daß aus den Farbsalzen durch Alkali die farblose Karbinolbase entsteht:

$$ClH_2N = C_6H_4 = C\begin{cases} C_6H_4NH_2 \\ C_6H_4NH_2 \end{cases} + NaOH \longrightarrow H_2N - C_6H_4 - \underset{OH}{C}\begin{cases} C_6H_5NH_2 \\ C_6H_5NH_2 \end{cases} + NaCl$$

5b. Fuchsin, Magenta

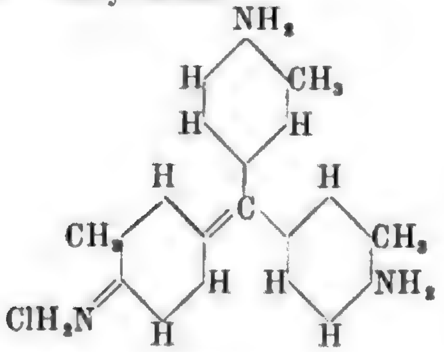


gemischt mit Parafuchsin und Ditolylfuchsin.

Darstellung: Enthält die Fuchsinschmelze 1. außer p-Toluidin und Anilin noch o-Toluidin wie dies bei rohem „Anilinöl" der Fall ist, so spielt das o-Toluidin die Rolle des Anilins, man erhält nicht nur das von Triphenylmethan abstammende Parafuchsin, sondern auch das vom Diphenyltolylmethan und teilweise auch das vom Ditolylphenylmethan abstammende Homologe, ein Gemisch, das ein wenig blaustichiger färbt als Parafuchsin, im übrigen aber dieselben Eigenschaften zeigt.

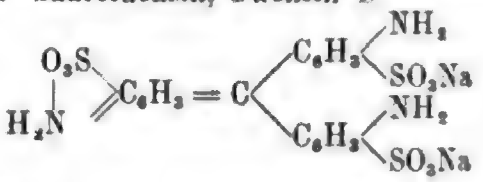
Noch blaustichiger färbt

5c. Tritolylfuchsin



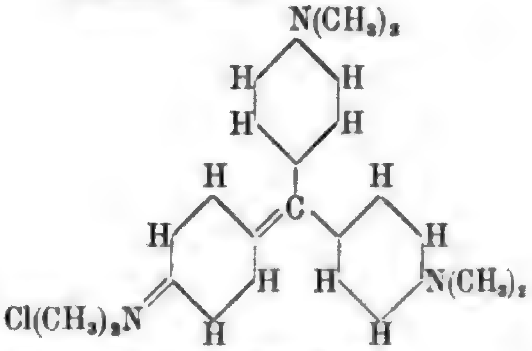
dargestellt nach dem Verfahren 2. aus p-Diaminoditolylmethan und o-Toluidin. Alle diese Fuchsine bilden metallisch grün glänzende Kristalle oder Pulver und lösen sich in Wasser.

6. Säurefuchsin, Fuchsin S



Wird durch Erhitzen von Fuchsin mit rauchender Schwefelsäure dargestellt und ist ein vielbenützter fuchsinroter Wollfarbstoff, aber wenig lichtecht und ganz säureunecht.

7. Kristallviolett

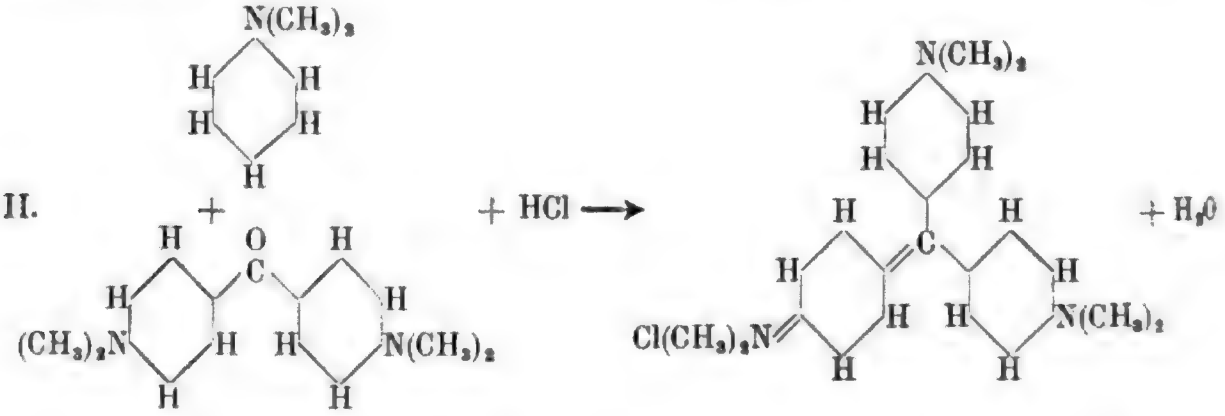


Darstellung: Dimethylanilin wird mit Phosgen (unter Zusatz von Phosphoroxychlorid $POCl_3$) auf 100° erhitzt und der Farbstoff aus Wasser umkristallisiert:

I. $2C_6H_5N(CH_3)_2 + COCl_2 \rightarrow (CH_3)_2NC_6H_4.CO.C_6H_4N(CH_3)_2 + 2HCl$

Tetramethyldiaminobenzophenon, Michlers Keton

II.



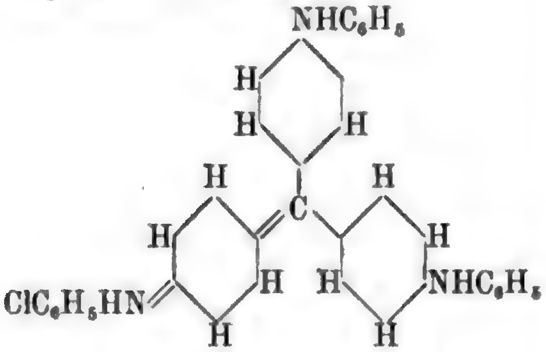
Messingglänzende Kristalle, die schön blauviolett färben. Dient zur direkten Färbung von Wolle, Seide und Jute und als Baumwollfarbstoff auf Tanninbeize, ferner zum Drucken von Wolle und Baumwolle und in der Buntpapierfabrikation; die mit Gerbstoffen hergestellten Lacke als Farbe im Buch-, Stein- und Tapetendruck, sowie als Anstrichfarbe; ferner als violette Tinte, Hektographen- und Stempelfarbe. Echtheitseigenschaften wenig besser als bei Fuchsin.

8. Methylviolett B bis 6B. Besteht aus in den Aminogruppen verschieden weit alkylierten Fuchsinen, die durch ein ähnliches Schmelzverfahren wie das Fuchsin aus Dimethylanilin, Methylbenzylanilin usw. ge-

Digitized by Google

wonnen werden; dabei liefert durch verwickelte Oxydationsvorgänge aus den Alkylanilinen abgespaltenes Methyl das Methankohlenstoffatom für den Aufbau des Triphenylmethankernes. Die verschiedenen Marken liefern je nach dem Grade der Alkylierung violette Töne von Rotviolett bis Blauviolett. Der Farbstoff wird verwendet wie das Kristallviolett.

9a) Anilinblau, spritlöslich, Spritblau, Gentianablau



Darstellung: Parafuchsin wird durch Erhitzen mit Anilin in Triphenylparafuchsin übergeführt:

I. $(H_2NC_6H_4)_3COH + 3C_6H_5NH_2 \rightarrow$
Triaminotriphenylkarbinol, Parafuchsinbase
$(C_6H_5HNC_6H_4)_3COH + 3NH_3$
Triphenyltriaminotriphenylkarbinol

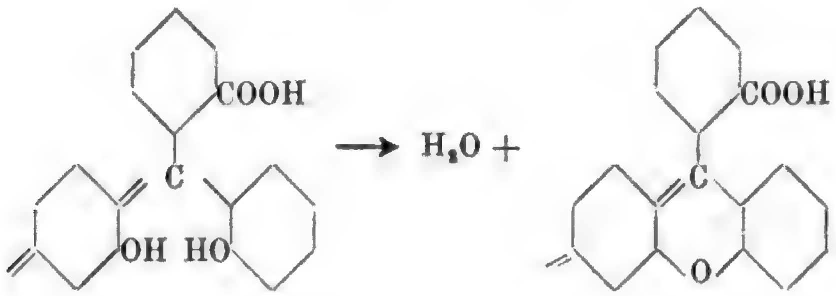
II. $(C_6H_5HNC_6H_4)_3COH + HCl \rightarrow$
$(C_6H_5HNC_6H_4)_2C=C_6H_4=NHC_6H_5Cl + H_2O$
Triphenylparafuchsin

Braunrotes, kristallines Pulver, in Wasser unlöslich, in Sprit löslich. Säureechter und mäßig lichtechter, rein blauer Farbstoff, hauptsächlich zum Färben von Firnissen benützt.

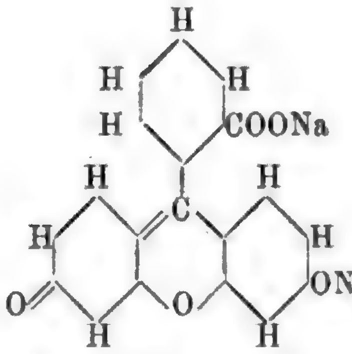
9b) Sulfonsäuren des Spritblau. Verschiedene Sulfonsäuren des Spritblaus finden in Form ihrer leicht in Wasser löslichen Alkalisalze als ziemlich lichtechte, säureechte, schön blaue Farbstoffe ausgedehnte Anwendung zum Färben von Seide, Wolle und Leder; die Färbungen auf Papier und gerbstoffgebeizte Baumwolle sind weniger echt. Im Handel heißen diese sulfonierten Anilinblaue Wasserblau, Bayrisch Blau, Alkaliblau.

Phtaleine.

Wertvolle Farbstoffe sind nur solche Phtaleine, die einen Xanthenring besitzen, entstanden durch Wasserabspaltung aus zwei Phenolresten:

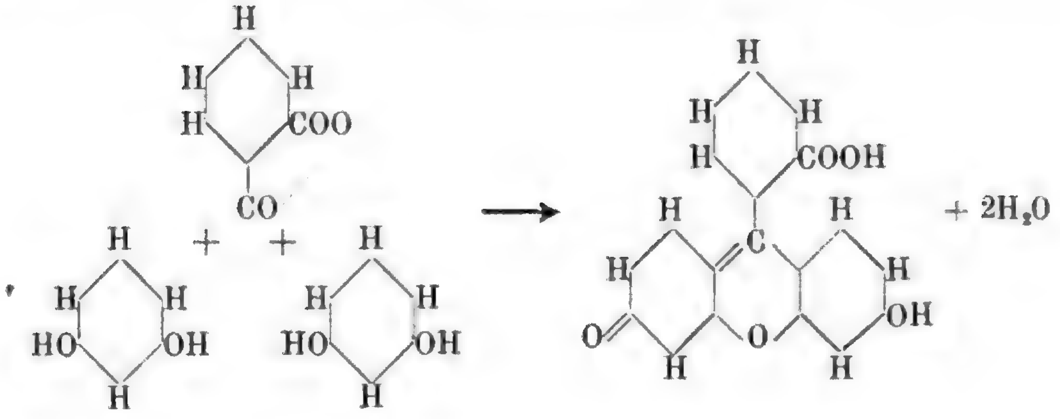


10. Fluorescein, Uranin, Resorcinphtalein

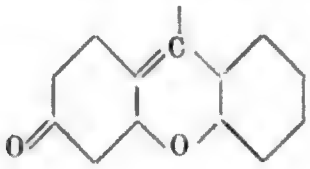
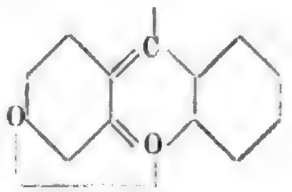


Darstellung: Durch Erhitzen von Phtalsäureanhydrid mit Resorcin auf 200°:

Digitized by Google



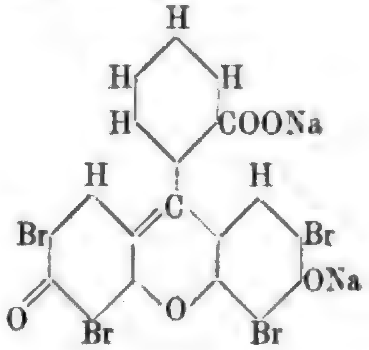
(Für das Fluorescein und seine Abkömmlinge läßt sich statt der p-chinoiden Schreibweise

 auch die o-chinoide 

durchführen; im folgenden wird durchweg die p-chinoide Formulierung beibehalten).

Fluorescin ist ein braunrotes, in Wasser schwer lösliches Pulver; die leicht löslichen Alkalisalze zeichnen sich durch kräftige grüne Fluoreszenz aus. Der Farbstoff färbt Seide hellgelb mit schöner Fluoreszenz, wird aber seiner geringen Echtheit wegen nicht viel verwendet. Die Hauptmenge des fabrikmäßig hergestellten Fluoresceins dient zur Gewinnung der Eosine. Bemerkenswert ist seine Verwertung zur Erforschung unterirdischer Wasserläufe, wozu es sich durch seine außerordentlich starke grüne Fluoreszenz eignet. Eine 1prozentige Lösung des NH_4-Salzes ist rotbraun, kaum fluoreszierend; bei einer Verdünnung $\frac{1}{100000}$ erscheint die Lösung blaßgelb, sehr stark grün fluoreszierend, bei $\frac{1}{1000000}$ farblos, im Tageslicht kräftig fluoreszierend, bei $\frac{1}{100000000}$ ist im Sonnenlicht die Fluoreszenz noch gut sichtbar und selbst bei $\frac{1}{100000000000}$ im Strahlenkegel einer Sammellinse noch sicher wahrnehmbar; d. h. 1 g in Ammoniakflüssigkeit gelöst und im Wasser eines Sees von 2 km Länge, 1 km Breite und 5 m Tiefe verteilt läßt sich noch bequem erkennen, wenn durch 10 ccm solchen Wassers ein Strahlenkegel Sonnenlicht durchtritt.

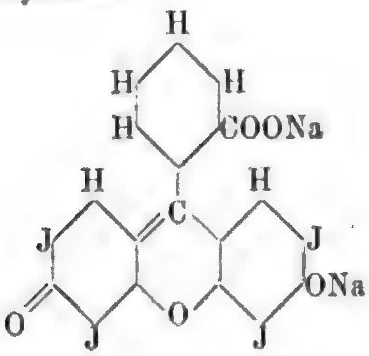
11. Eosin, Eosin gelblich



Darstellung durch Bromierung von Fluorescein. Rote, stahlblau schimmernde Kriställchen, leicht löslich in Wasser mit grüner Fluoreszenz. Färbt Wolle und Seide in prachtvoll reinen Tönen von gelblich Rosa bis Scharlach; dazu zeichnen sich die Seidenfärbungen noch durch gelbgrün schimmernde Fluoreszenz aus. Leider ist die Lichtechtheit ganz ungenügend. Die Lösung dient als rote Tinte, die unlöslichen Blei- und Zinnlacke, auf Tonerde, Schwerspat oder Mennige niedergeschlagen als Ersatz für Zinnober, Krapp- und Karminlacke zu Anstrich- und Druckfarben, die massenhaft verwendet werden; sie sind sämtlich hervorragend schön, billig und unecht. Sehr wertvoll ist das Eosin und seine Verwandten, ebenso wie Fuchsin, Methylviolett und einige ihrer Abkömmlinge

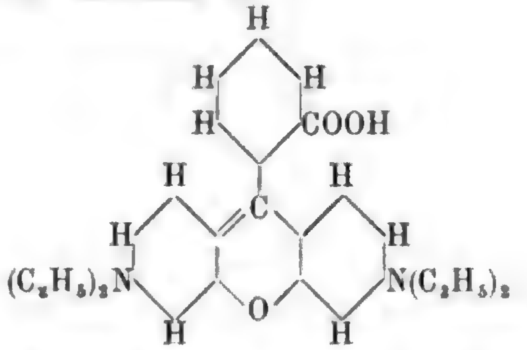
in der mikroskopischen Färbetechnik. Denn je nach Art und Anwendung eines dieser Farbstoffe färbt er bestimmte Zell- und Gewebebestandteile an oder nicht, läßt sich auslaugen oder haftet, und macht auf diese Weise Dinge sichtbar und unterscheidbar, die sich ohne solche Färbungen der Beobachtung entzögen. Heute weiß schon der Laie, daß z. B. die Bakterienforschung ihre Fortschritte zum guten Teil den mikroskopischen Färbungsverfahren verdankt (vgl. den Artikel „Mikroskopische Technik“).

12. Erythrosin



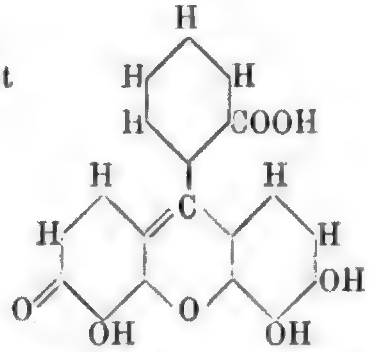
Darstellung durch Jodieren von Fluorescein. Färbt Wolle und Seide weit blaustichiger als Eosin in leuchtenden Tönen von Rosa bis Karmin und wird auch für Baumwolle auf Tonerdebeize verwendet, ist aber nicht lichtechter als Eosin. Noch blaustichigere Färbungen liefern die von chlorierten Phtalsäuren abstammenden, als Phloxine im Handel vorkommenden Eosine.

13. Rhodamin B

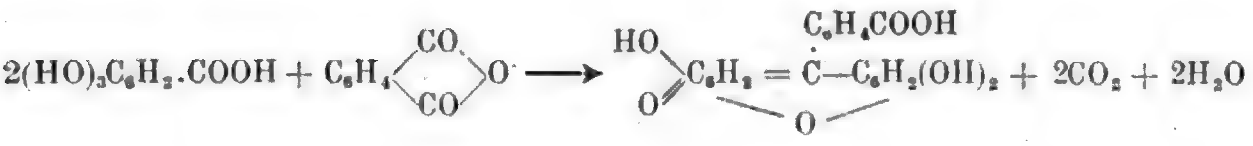


Darstellung durch Erhitzen von Phtalsäureanhydrid mit Diäthyl-m-Aminophenol, analog der Fluoresceinsynthese. Grüne Kristalle oder braunrotes Pulver, löslich in Wasser mit roter Farbe und gelbroter Fluoreszenz; liefert auf Seide und Wolle ungewöhnlich feurige, reine Färbungen von hellem Rosa bis zu Karmin, die viel echter als die Eosinfärbungen und auch echter als die früher mit Cochenille hergestellten Färbungen sind und in Färberei und Druckerei sehr ausgedehnte Anwendung finden. Auch die Färbungen auf Baumwolle mittels Aluminiumbeizen sind leidlich echt, wenn auch weniger schön. Die Seide zeigt außer der feurigen Färbung noch besonders schöne, rotgelbe Fluoreszenz.

14. Gallein, Alizarinviolett



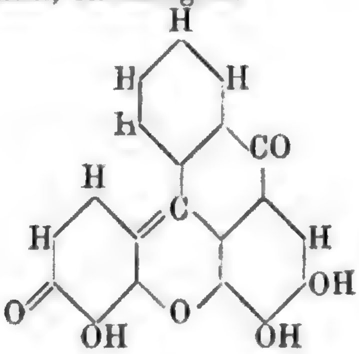
Darstellung: Durch Erhitzen von Gallussäure mit Phtalsäureanhydrid auf 200°:



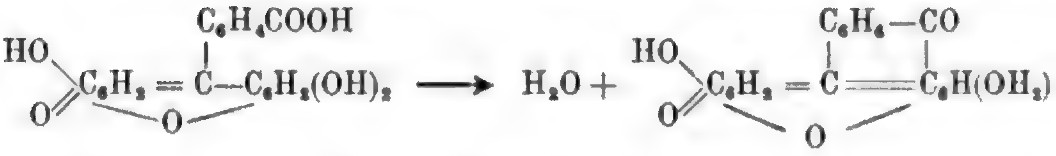
Rotbraunes, metallisch grün glänzendes Kristallpulver, fast unlöslich in kaltem Wasser. Tief violetter Farbstoff auf Chrombeize zum Färben und Drucken von Wolle und Baumwolle mit sehr guten Echtheitseigenschaften.

Digitized by Google

15. Coerulein, Alizaringrün



Darstellung: Durch Erhitzen von Gallein mit konzentrierter Schwefelsäure auf 200°:

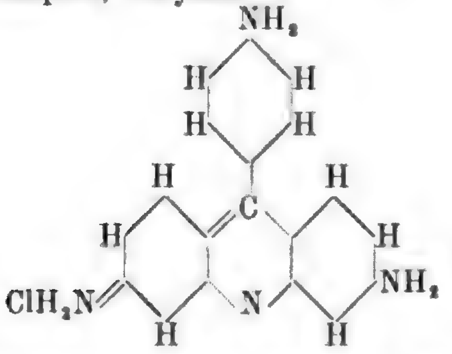


Die Wasserabspaltung erfolgt unter Schließung eines Anthrachinonringes, so daß das Coerulein gleichzeitig einen Triphenylmethan-, einen Xanthen- und einen Anthracenkern enthält.

Blauschwarzes, kupferrot schimmerndes Pulver, fast unlöslich in Wasser. Ausgezeichnet echter Beizenfarbstoff, der auf Aluminiumbeize ziemlich rein hellgrün, auf Chrombeize dunkel olivgrün färbt und für Seide, Wolle, Baumwolle und Leinen zum Färben und Drucken gebraucht wird.

B. Akridinfarbstoffe.

16. Phosphin, Chrysanilin

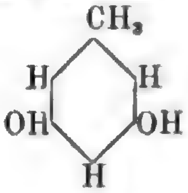


Darstellung: Nebenprodukt der Fuchsinschmelze, s. Nr. 5a. Aus der Fuchsinmutterlauge kristallisiert nach Zusatz von Salpetersäure das Nitrat als rotgelbes Kristallpulver. Wird hauptsächlich in der Lederfärberei zur Herstellung befriedigend echter Töne zwischen rötlichgelb und dunkel braunorange verwendet.

V. Farbstoffe unzureichend bekannter Struktur.

a) Schwefelfarbstoffe. Unter dieser Bezeichnung versteht man eine Anzahl von technisch wichtigen Farbstoffen, die Baumwolle direkt färben und teilweise sehr gute Echtheitseigenschaften besitzen. Durchweg hochmolekular und in Wasser kaum löslich, bilden sie mit Schwefelnatrium in Wasser kolloidale Lösungen, aus denen sie auf Baumwolle aufziehen und nach einem meist durch Aushängen an die Luft bewirkten Oxydationsprozeß waschecht haften. Ueberwiegend erhält man mit den Schwefelfarbstoffen stumpfe Töne von Braungelb, Oliv, Dunkelblau, Dunkelgrün und Schwarz. Dargestellt werden die Schwefelfarbstoffe durch Verschmelzen von Nitro- oder Aminophenolen mit Schwefel und Schwefelnatrium. Als Vertreter seien genannt: Schwefelschwarz, Immedialblau, Immedialschwarz, Katigenindigo, Auronalgelb.

b) Flechtenfarbstoffe. Die Muttersubstanz dieser Farbstoffe ist das Orcin



welches frei oder in einfachen Abkömmlingen in vielen Flechten (Roccella-, Lecanora-, Variolaria-Arten) vorkommt und unter der Einwirkung von Ammoniak und Luft in das gefärbte und färbende Orcein sich umwandelt. Orcein ist ein Beizenfarbstoff, der mittels Aluminium- und Zinnbeizen auf Seide und Wolle ein schönes Rot und Rotviolett erzeugt, das trotz seiner Lichtunechtheit bis heute noch durch den Wettbewerb ähnlich färbender Azofarbstoffe erst teilweise verdrängt ist.

Ueberläßt man die nämlichen Flechten einer längeren Gärung, so erhält man den Lakmusfarbstoff, der heute ganz auf den Gebrauch als Indikator beschränkt ist

Digitized by Google

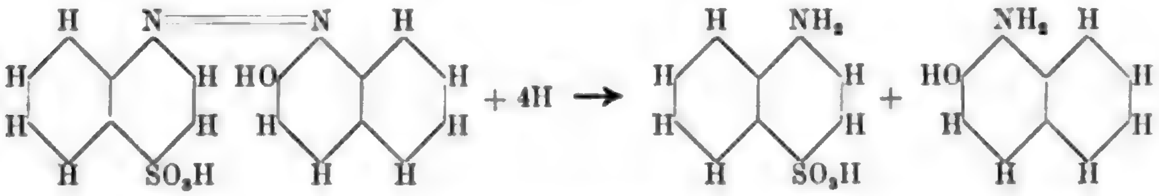
c) Curcumin. Curcumin ist der gelbe Farbstoff der Curcumawurzel, der durch Alkali in rotbraun umschlägt und deshalb als Indikator dient, früher aber zum Gelbfärben von Seide, Baumwolle und Papier viel gebraucht wurde.

d) Catechu, Cachou. Catechu heißt ein Farbstoff, der neben verschiedenen Gerbsäuren in den Auszügen aus dem Holz von Acacia catechu und Uncaria Gambir sowie aus der Frucht der Arekapalme vorkommt. Der unlösliche Gerbstoff entsteht durch Oxydation der löslichen Catechinsäure und gibt ein Braun, Oliv, Grau und Schwarz von vorzüglicher Echtheit. Deshalb findet er zum Färben und Bedrucken von Baumwolle eine ausgedehnte Anwendung.

8. Analytische Erkennung und quantitative Bestimmung von Farbstoffen. Die Erkennung von Farbstoffen auf der Faser oder in Substanz ist eine Aufgabe, die dem Färbereichemiker sehr häufig gestellt wird und die sich trotz der großen Anzahl im Handel befindlicher Farbstoffe meist als lösbar erweist, oft in kurzer Frist mittels weniger Reaktionen. Es gehören aber dazu gründliche allgemeine Kenntnisse in der Chemie und große Erfahrung auf dem Gebiete der Farbenchemie, und hier läßt sich lediglich kurz andeuten, welche Mittel für diesen Zweck zur Verfügung stehen. Jeder Farbstoff hat in Lösung ein ganz bestimmtes Absorptionsspektrum und für einige sind ihre Absorptionsbänder so kennzeichnend, daß man sie daran sofort im Spektroskop erkennt; für andere trifft das zwar nicht zu, aber sie verraten sich durch auffällige Aenderungen, die ihr Spektrum durch Zusatz von Säuren, Alkalien oder Metallsalzen erleidet; wieder andere eignen sich überhaupt wenig für spektroskopische Beobachtung. Erschwert wird die Untersuchung selbstverständlich, wenn nicht ein einziger, sondern Gemische mehrerer Farbstoffe vorliegen. Darüber unterrichtet in der Regel ein einfacher kapillaranalytischer Versuch ausreichend: Man hängt Filtrierpapierstreifen so auf, daß sie mit ihrem unteren Ende in die Farbstofflösung eintauchen; ist nur ein Farbstoff vorhanden, so steigt die Lösung mit einheitlicher, nur stetig blasser werdenden Farbe im Streifen in die Höhe, sind es aber mehrere, so ist die Geschwindigkeit des Aufsteigens und die nach längerer Zeit erreichte Höhe für die einzelnen Farbstoffe verschieden und die Färbung der Streifen ändert sich Schritt für Schritt.

Schon ohne spektralanalytische Beobachtung erkennt man viele der häufigsten Farbstoffe auf der Faser wie in Substanz durch ihr Verhalten gegen neutrale Lösungsmittel — Wasser, Alkohol, Aether —, durch Fluoreszenzerscheinungen, durch die Färbung ihrer Lösung in konzentrierter Schwefelsäure, durch Farbenänderungen auf Zusatz von Alkalien, Säuren, Beizenlösungen, Oxydations- und Reduktionsmitteln, durch die Fähigkeit Wolle anzufärben, Baumwolle aber nicht und umgekehrt. Zur Veranschaulichung ein einziges Beispiel:

Braunrotes Pulver, in Wasser tiefrot löslich; erweist sich durch Kapillaranalyse als einheitlich. Färbt Wolle aus saurem Bade tiefrot an, läßt aber Baumwolle ungefärbt. Verdünnte Säuren und Alkalien bewirken keinen Farbenumschlag. Vermutlich ein roter Azofarbstoff. Durch Kochen mit Zinkstaub und Salzsäure wird die Verbindung entfärbt und scheidet einen weißen Niederschlag aus, der sich als Naphtionsäure erweist; in Lösung bleibt ein salzsaures Salz, durch Acetylierung und die leichte Oxydierbarkeit zu β-Naphtochinon als salzsaures 1-Amino-2-Naphtol zu erkennen. Hiernach muß der ursprüngliche Farbstoff hergestellt sein durch Kuppelung von diazotierter Naphtionsäure mit β-Naphtol. Denn Azofarbstoffe liefern bei kräftiger Reduktion keine Leukokörper, sondern spalten sich stets derart, daß man die ursprünglich diazotierte Komponente, das primäre Amin als solches, die damit gekuppelte andere Komponente um eine Aminogruppe reicher zurückerhält. Der untersuchte Farbstoff ist also Echtrot A, der Azofarbstoff Nr. 7 (S. 881), welcher sich nach der Gleichung spaltet:



Zur quantitativen Bestimmung eines Farbstoffes hat man zwei Wege, die sich gegenseitig ergänzen:

1. Man vergleicht mittels eines Kolorimeters eine Lösung des betreffenden Farbstoffes von bekanntem Gehalt mit einer solchen des zu untersuchenden, was allerdings oft Schwierigkeiten bietet, wenn sie infolge von Beimengungen verschiedener Art verschiedene Farbentöne zeigen. Denn nur gleiche Farbentöne von verschiedener Stärke lassen sich kolorimetrisch ohne gröbere Fehler miteinander vergleichen, nicht aber beispielsweise ein rotstichiges mit einem reinen Blau.

2. Man macht Probefärbungen und ver-

Digitized by Google

gleicht die mit bestimmten Mengen des einen Farbstoffs als Typ hergestellte Ausfärbung mit der des zu untersuchenden, ein Verfahren, das jedoch die sachkundige Hand und das geübte Auge des Farbenchemikers erfordert.

9. Geschichtliches und Statistisches. Zwei der echtesten und schönsten organischen Farbstoffe, Krapp und Indigo, sind seit Jahrtausenden bekannt, denn schon die alten Aegypter verstanden damit Gewebe rot und blau zu färben. Der erste künstlich hergestellte, aber zunächst kaum praktisch verwertete Farbstoff war die Pikrinsäure (1771). Auf Anregung von A. W. Hoffmann fanden Perkin 1856 das jetzt kaum mehr gebrauchte Mauvein, Verguin und Renard 1858 das Fuchsin. 1864 und 1866 kamen die ersten Azofarbstoffe, Aminoazobenzol und Chrysoidin, in Handel, 1867 durch Poirrier und Chapat das Methylviolett. 1869 fanden Graebe und Liebermann die Darstellung des Alizarins aus Anthracen und damit das erste und ungeheuer wichtige Beispiel des Aufbaues eines hervorragend wertvollen Pflanzenfarbstoffes aus einem Teerkohlenwasserstoff. Von 1874 an begann die technische Darstellung der von A. Baeyer entdeckten Phtaleine, 1877 die des durch Caro entdeckten Methylenblaus und des von E. und O. Fischer und von Doebner aufgefundenen Malachitgrüns. 1879 führte R. Nietzki mit dem Biebricher Scharlach den ersten Disazofarbstoff in die Technik ein. 1880 nahm A. Baeyer das erste Patent auf die Synthese von Indigblau; doch dauerte es noch 18 Jahre, bis von den zahlreichen aufgefundenen Verfahren das Heumannsche in zwei verschiedenen Ausführungsweisen die Darstellung des Indigblaus im großen gestattete und der künstliche Indigo seinen Siegeszug antrat. 1884 fand Böttiger die vom Benzidin abstammenden, Baumwolle ohne Beize färbenden Disazofarbstoffe, 1893 Vidal den ersten schwarzen Schwefelfarbstoff und seit 1900 hat das Gebiet der Schwefelfarbstoffe wie der Indigofarbstoffe einen ungeahnten Ausbau erfahren. Die Industrie der Teerfarbstoffe hat ihren Ausgang von England und Frankreich genommen, ihre großartige Entwickelung aber in Deutschland gefunden, so daß Deutschland, welches noch vor 50 Jahren alle seine Farbstoffe aus dem Ausland beziehen mußte, heute diese fast ausschließlich selbst erzeugt und noch für 160 Mill. M. jährlich ausführt. Mußte früher Deutschland den Krapp aus südlicheren Ländern kaufen, so stellt es sich seit 1872 seine Alizarinfarbstoffe selbst her und deckt noch den größten Teil des Bedarfs anderer Länder. Der nämliche Vorgang spielt sich seit 1900 mit dem Indigo ab. Die Gesamterzeugung an Pflanzenindigo betrug etwa 9 Mill. kg jährlich mit einem Gehalt von etwa 5 Mill. kg Indigblau im Wert von rund 100 Mill. M.; davon führte Deutschland für 20 Mill. M. ein. Heute stellt Deutschland seinen ganzen Bedarf aus einheimischen Rohstoffen selbst her und führt noch für über 10 Mill. M. Indigblau aus; dabei ist der Preis des reinen Farbstoffs von 20 M. auf 6 M. für das kg gesunken, so daß der schöne echte Farbstoff mit ähnlich färbenden, billigen und unechten Farbstoffen erfolgreich in Wettbewerb treten kann.

Die glänzenden Fortschritte der Teerfarbenindustrie beruhen, wenn man alle kaufmännischen und volkswirtschaftlichen Zusammenhänge ausschaltet und nur die rein chemische Seite betrachtet, keineswegs auf Entdeckungen im gewöhnlichen Sinne, auf glücklichen Funden, sondern sie sind in rastloser Arbeit Schritt für Schritt zielbewußt errungene Erfolge, fast in jedem einzelnen wichtigen Falle zunächst rein wissenschaftlicher, dann wissenschaftlicher und technischer Art in engem Verein unter gewissenhafter Beobachtung und Erforschung aller auftretenden gewollten und nicht gewollten Reaktionen.

Literatur. **H. Th. Bucherer**, *Die Mineral-, Pflanzen- und Teerfarben. Leipzig 1911.* — **R. Möhlau und H. Th. Bucherer**, *Farbenchemisches Praktikum. Leipzig 1908.* — **R. Nietzki**, *Chemie der organischen Farbstoffe. Berlin 1905.* — **G. Schultz und P. Julius**, *Tabellarische Uebersicht der künstlichen organischen Farbstoffe. Berlin 1902.* — **E. Ristenpart**, *Organische Farbstoffe. Leipzig 1911.* — **H. Wichelhaus**, *Organische Farbstoffe. Dresden 1908.*

K. Elbs.

Farne im weitesten Sinne. Pteridophyta.

Einleitung. 1. Filicales. a) Beschaffenheit und Gestalt des Sporophyten. b) Vergleichende Anatomie des Sporophyten. c) Aderung des Blattes. d) Epidermale Anhangsgebilde. e) Stellung der Sori. Lage und Anordnung der Sporangien. f) Schutzvorrichtungen des Sorus. Indusium. g) Struktur der Sporangien. h) Gestalt und Häute der Sporen. i) Apikale Meristeme und Primordien der Sporangien. k) Prothallium. l) Antheridium. m) Archegonium. n) Embryo. Beschreibung der Hauptfamilien. A. Simplices. B. Gradatae und Mixtae. 2. Equisetales. 3. Lycopadiales. A. Eligulatae. B. Ligulatae. 4. Sphenophyllales.

Einleitung. Die Gruppe der Pteridophyten (Farnpflanzen) umfaßt diejenigen Ge-

Digitized by Google

fäßpflanzen, welche keine Samen tragen. Die Samenpflanzen sind sicher von Ahnen herzuleiten, die im wesentlichen Farncharakter trugen. Diese Annahme findet eine starke Stütze in der Tatsache, daß gewisse fossile Pteridophyten (vgl. den Artikel „Fortpflanzung der Pflanzen") Organe trugen, die den Samen der höheren Pflanzen sehr nahe stehen; auf der anderen Seite finden wir Samenpflanzen, die in ihrem vegetativen Aufbau und in ihrem Fortpflanzungsmodus außerordentlich gewissen Pteridophyten ähneln, die keine Samen bilden. Die Pteridophyten sind Gefäßpflanzen und zeigen in ihrem ganzen Aufbau deutlich, daß sie an das Leben auf dem Lande angepaßt sind. Dementsprechend kann man sie als die primitivsten unter den Pflanzen betrachten, die in das Leben auf dem Lande angepaßt sind.

Andererseits aber zeigen die einfacheren Vertreter der Gruppe in den beiden Generationen (Gametophyt und Sporophyt) große Uebereinstimmung mit den Bryophyten (vgl. den Artikel „Fortpflanzung der Moose und der Farne"). Manche meinen, daß diese Aehnlichkeit auf einen gemeinsamen Ursprung hinweise. Andere denken, daß die beiden Gruppen eine Anpassung an die gleichen äußeren Bedingungen zeigen, die parallel aber getrennt vor sich gegangen sei; daß nämlich beide sich an das Leben auf dem Lande angepaßt haben, obwohl sie beide von Wasserpflanzen herstammen, die wahrscheinlich von der Art unserer heutigen, im Wasser lebenden Algen waren (vgl. den Artikel „Fortpflanzung"). Mag dem sein wie ihm wolle, sicher ist, daß die Pteridophyten in mehr als einer Beziehung die einfachsten Gefäßpflanzen sind. Ferner sagen uns geologische Befunde, daß sie einen großen, ja den vorherrschenden Bestandteil der Vegetation der primären Gesteine ausmachten. Wenn sie es nicht zur Bildung echter Samen gebracht haben, so ist das ein Hinweis darauf, daß sie die Fähigkeit, auf dem Lande zu leben, nicht vollständig erlangten. Sie brauchen noch heute für jeden Befruchtungsakt flüssiges Wasser. Wir können also sagen, daß die Pteridophyten eine Mittelstellung in der Reihe der pflanzlichen Organismen einnehmen (vgl. den Artikel „Fortpflanzung").

Obwohl also die Pteridophyten unter den Landgewächsen nicht die oberste Stelle einnehmen, zeigen sie doch in der Anpassung an ihre Umgebung, wie auch in manchen Fällen in der Zahl ihrer Species, ein überraschendes Maß erfolgreicher Entwickelung.

Man pflegt von der Kohlenperiode als von dem Zeitalter der Pteridophyten zu reden und anzunehmen, daß die heutigen Vertreter dieser alten Stämme degeneriert sind. Das mag für manche von ihnen zutreffen, es sind ja gewisse Typen, die wir fossil kennen, längst ganz ausgestorben. Von anderen dagegen und besonders von dem großen Stamm der Filicales können wir ohne Uebertreibung sagen, daß zu keiner Periode der Erdgeschichte ihre Flora reicher war als gegenwärtig. Die homosporen Filices haben wahrscheinlich in der Jetztzeit den Höhepunkt ihrer Entwickelung erreicht.

Die bekannten Pteridophyten setzen sich zusammen aus mehreren getrennten Reihen (Phyla). Zurzeit ist eine Ableitung derselben voneinander unmöglich, ja es ist zweifelhaft, ob irgend zwei von ihnen gemeinsame Ahnen hatten. Trotz aller Verschiedenheiten im einzelnen zeigen diese Reihen aber doch so viele Analogien miteinander, daß sie entweder in parallelen Linien sich entwickelt haben, oder daß sie Nachkommen gemeinsamer, allerdings weit zurückliegender Ursprungsformen sein müssen. Das alles aber ist heute hypothetisch. Für unsere Zwecke ist es wohl das beste, alle diese Phyla getrennt zu behandeln, sie als parallele Reihen betrachtend. Wir kennen 4 Reihen; es kann jedoch diese Zahl jederzeit vermehrt werden durch die Entdeckung fossiler, längst ausgestorbener Formen. Die bis jetzt bekannten Phyla sind

1. die **Filicales** oder Farne im engeren Sinne,
2. die **Equisetales** oder Schachtelhalme,
3. die **Lycopodiales** oder Bärlappgewächse,
4. die **Sphenophyllales**, einschließlich der Psilotaceae.

Ihre Geschichte reicht zurück bis zur paläozoischen Periode, und sie alle (wenn die Psilotaceae zu den Sphenophyllales gerechnet werden) sind in der jetzt lebenden Flora unserer Erde vertreten. Das frühe Vorkommen und die lange Geschichte dieser Pflanzen und ihre Zwischenstellung zwischen ihren wasserlebenden Ahnen und der vollkommen spezialisierten Landflora machen sie für uns besonders interessant.

1. Filicales.

Mit diesem Namen werden die Pteridophyten bezeichnet, deren Blätter im Verhältnis zu der sie tragenden Achse groß sind (Fig. 1). Die gewöhnlichen Farne gehören hierher. Einen solchen Sproß nennt man megaphyll. Die Vertreter der anderen Reihen haben an den Achsen verhältnismäßig

Digitized by Google

kleine Blätter, dementsprechend nennt man sie mikrophyll. Man wird denken, daß die bloßen Größenverhältnisse zwischen dem Sproß und dessen Gliedern kaum eine wissenschaftliche Grundlage für die Unterscheidung der Filicales von den anderen Gruppen der Pteridophyten ergeben könnten. Aber eine weitgehende Vergleichung zeigt, daß dieser Charakter für die Einteilung ausreicht, daß

Fig. 1. Habitus eines Baumfarnes (Alsophila crinita), auf Ceylon wachsend. Verkleinert. Nach Strasburger.

er immer zusammentrifft mit anderen weniger deutlich sichtbaren Merkmalen. Zudem ergibt die anatomische Untersuchung, daß die Megaphyllie einen entscheidenden Einfluß auf die innere Struktur ausübte, so daß für die Diagnose wichtige Eigenschaften entstanden. So können wir denn die Megaphyllie der Filicales als das am meisten hervortretende und außerordentlich konstante Unterscheidungsmerkmal annehmen.

Die Filicales umfassen mehr und mannigfaltigere Formenreihen als irgendein anderer Stamm der Pteridophyten. Die Zahl der lebenden Species ist ungefähr 7000, und obgleich sie an trockenen Standorten selten sind oder ganz fehlen, sind sie doch weit über die Erde verbreitet; wir finden sie überall, wo einigermaßen genügende Feuchtigkeit vorhanden ist, um das Wachstum der meist zarten Blätter zu gestatten und ihre Entwickelung zu ermöglichen. In klimatischer Hinsicht kann man sie als typische mesotherme Hygrophyten bezeichnen; denn die meisten verlangen schattige Standorte, wenn auch einige Formen dem Leben an exponiert sonnigen Stellen angepaßt sind. Den ihnen am meisten zusagenden Standort finden sie im Schatten des tropischen Regenwaldes, und dort bilden sie denn auch den vorwiegenden Bestandteil des Unterholzes. In gewissen Gebieten der Nordinsel von Neu-Seeland ist sogar der Wald selbst aus baumförmigen Farnen zusammengesetzt. Selten kämpfen die Farne erfolgreich gegen die Vegetation der Blütenpflanzen. In den gemäßigten Zonen treten sie mehr und mehr zurück, wenn auch besonders harte Arten, wie z. B. der Adlerfarn (Pteridium aquilinum), in nördlicheren Gebieten große Flächen bedecken. Von allen Farnen ist er überhaupt der erfolgreichste Konkurrent der mit ihm zusammenlebenden vollkommeneren Samenpflanzen. Gegen die kälteren Gebiete hin nimmt die Zahl der Farnspecies ab. Wir finden ja vereinzelte Formen noch in beträchtlichen Gebirgshöhen, aber das sind nur spärliche und unbedeutende Vorkommen der im wesentlichen doch mesothermen hygrophyten Flora der Filicales.

Die Geschichte der Filicales geht zurück bis zur paläozoischen Periode. Wir werden später sehen, daß tatsächlich die meisten der heute lebenden Farngattungen und -arten verhältnismäßig rezenten Ursprungs sind. Aber es gibt doch einige wenige, welche die lebenden Relikte längst vergangener Zeiten darstellen. Das Paläozoikum hatte eine große Zahl von Organismen mit farnähnlicher Beblätterung. Es hat sich jedoch erwiesen, daß ein großer Teil derselben wirkliche Samenpflanzen waren, aus welchen dann die neue Klasse der Pteridospermen (vgl. den Artikel „Fortpflanzung der Pflanzen") gebildet wurde, und es ist noch gar nicht möglich zu entscheiden, wie viele von den Fossilen, die ähnliche Fortpflanzungskörper tragen, man noch dazu wird rechnen müssen. Es fragt sich nun also, welche von diesen paläozoischen Fossilien denn eigentlich wirklich die Ueberreste von echten Farnen darstellen.

Es wird weiter unten gezeigt werden, daß in den primären Gesteinen mindestens 3 Typen vorhanden sind, nämlich die Botryopteridae, gewisse Pecopteriden, und dann noch gewisse Formen, die mit einigen der niedersten Leptosporangiaten verwandt sind. Scott hat in einem speziellen Falle

Digitized by Google

den detaillierten Beweis für die homospore Natur dieser Pflanzen erbracht. Er hat bei Stauropteris Oldhamia, einem Fossil, das zu den Botryopterideae gehört, gefunden, daß die Sporen in dem Sporangium zu keimen vermögen, so wie wir das bei Todea, Trichomanes und einigen anderen lebenden, homosporen Farnen sehen können. Dieses eine Beispiel schon bildet ein heilsames Korrektiv jener Tendenz, die gleich nach der Entdeckung der Pteridospermen hervortrat, alle paläozoischen, farnähnlichen Pflanzen als potentielle Samenpflanzen zu betrachten. Natürlicher ist es jedenfalls, alle farnähnlichen Fossilien für echte Farne zu halten, solange bis ihr Pteridospermencharakter bewiesen ist (vgl. den Artikel „Fortpflanzung").

Das „onus probandi" haben diejenigen, welche jedem Fossil eine höhere Stellung geben wollen, während andere ruhig abwarten, bis der Beweis da ist.

Aus diesem Grunde wollen wir jetzt die Botryopteriden, gewisse Pecopteriden und einige andere als echte paläozoische Farne vom homosporen Typus ansehen, deren Entwickelungsgang sehr wahrscheinlich im wesentlichen der gleiche war wie der eines modernen Farnes. Das frühe Vorkommen homosporer Farne, welches die Entwickelungstheorie annimmt oder gar fordert, erscheint auf Grund des paläontologischen Beweismaterials über jeden Zweifel erhaben. Aber man hat erkannt, daß sie in der Flora jener Zeiten nicht so massenhaft vertreten waren, wie man zeitweise geglaubt hatte.

Die Einzelheiten der Entwickelung entscheiden dann die Frage, ob Samenpflanze oder Farn. Die Lebensgeschichte eines typischen homosporen Farnes wird in dem Artikel „Fortpflanzung der Pflanzen (Farne)" an dem Beispiel des gemeinen Schildfarns [Dryopteris, (Nephrodium) Filix mas] beschrieben und durch Bilder erläutert. Wir sehen dort, daß der Entwickelungszyklus aus 2 Phasen besteht, dem Sporophyt und dem Gametophyt, welche regelmäßig miteinander abwechseln. Der Sporophyt, die ungeschlechtliche Generation, tritt stärker hervor, und ist das, was man gemeinhin als Farnpflanze bezeichnet. Diese ist verhältnismäßig groß und von komplizierter Struktur, sie trägt relativ große, oft mehrfach gefiederte Blätter an einer Achse, die im Boden durch viele faserige Wurzeln befestigt ist (Fig. 2). Die ganze Pflanze ist durchzogen von einem Gefäßsystem, das wieder ein Beweis für den hohen Grad der Anpassung des Sporophyts an das Leben auf dem Trockenen ist. Wie der Name Sporophyt schon sagt, ist der Endzweck der Farnpflanze der, Sporen zu erzeugen. Diese werden gewöhnlich an der Unterseite der Blätter gebildet und finden sich in Kapseln, die man Sporangien nennt; diese selber wieder stehen meistens in großer Zahl zu Gruppen vereinigt und bilden die sogenannten Sori, die man mit bloßem Auge als bräunliche Flecken von verschiedener Gestalt und Größe an der Unterseite der fertilen Blätter erkennen kann. Die Verschiedenheiten im Bau der Sori benutzt man bei der Einteilung der Farne (Fig. 2 A, B, C). Wenn die Sporen reif

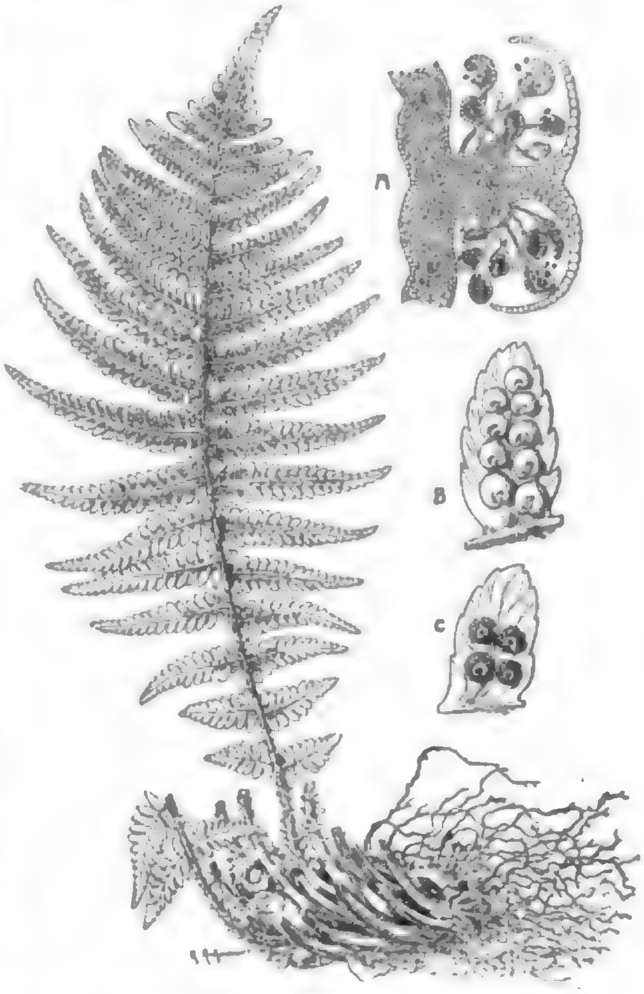


Fig. 2. Dryopteris (Nephrodium) Filix mas. A Vertikalschnitt durch einen Sorus, das Indusium bedeckt die gestielten Sporangien. Nach Kny. B ein Fiederblättchen mit Sori, die noch vom Indusium bedeckt sind. C dasselbe mit etwas älteren Sori mit geschrumpftem Indusium. Schwach vergrößert. Nach Strasburger.

sind, vermag der leichteste Wind sie fortzuführen. Jede Spore kann unter passenden äußeren Bedingungen keimen. Dabei entsteht immer ein kleiner, grüner, sich selbst ernährender Zellkörper, das Prothallium oder der Gametophyt. Dieser lebt vollständig getrennt vom Sporophyt und stellt die Geschlechtsgeneration dar (Fig. 3). Früher oder später bildet er die Sexualorgane, und zwar die männlichen, Antheridien genannt, und die weiblichen, die Archegonien. Bei

Vorhandensein von Wasser öffnen sich die reifen Archegonien und Antheridien, und aus den letzteren werden die Spermatozoiden entleert, die sich im Wasser zu den geöffneten Archegonien hinbewegen und in dieselben eindringen. Die Befruchtung erfolgt durch die Verschmelzung eines Spermatozoids mit dem Ei, das im Archegonium enthalten ist. Die Fusionszelle heißt Zygote; sie bildet den Ausgangspunkt für einen neuen Sporophyten, gleich dem vorhergehenden. Wir haben also einen regelmäßigen Wechsel zwischen ungeschlechtlicher und geschlechtlicher Generation. Alle Farne, mit Ausnahme gewisser anomaler Formen, die sich aber nie als wildwachsende Rassen erhalten haben, befolgen und wiederholen diesen Kreislauf der Entwickelung. Man darf wohl annehmen, daß diejenigen fossilen Formen, die man zu den Filicales rechnet, einen ähnlichen Entwickelungsgang durchmachten.

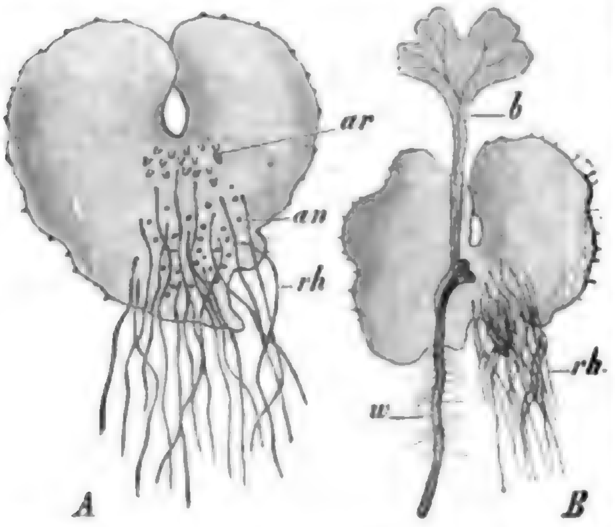


Fig. 3. Dryopteris Filix mas. A Prothallium von unten gesehen. ar Archegonien, an Antheridien, rh Rhizoiden. B Prothallium mit jungem Farn, der mit seinem Fuß an demselben ansitzt. b das erste Blatt, w die erste Wurzel. Vergrößerung ca. 8fach. Nach Strasburger.

Für die wissenschaftliche Behandlung der großen Zahl der bekannten Filicales, fossiler und moderner, ist es erwünscht, dieselben soweit als möglich gemäß ihren phyletischen Verwandtschaften zu klassifizieren. Mag auch die Klassifikation heute noch unvollkommen sein, so eignet sich doch keine größere Pflanzengruppe besser für ein solches Verfahren, als die Filicales. Denn wir besitzen von ihnen eine lange Reihe von Urkunden in Form gut erhaltener Fossilien, die bis in die frühesten Schichten der paläozoischen Periode zurückgehen, Wir können dieselben verfolgen durch die sekundären und tertiären Gesteine bis zu der Jetztzeit, wo die Filicales in einer größeren Zahl von Arten vertreten sind, als irgendwelche anderen Pteridophyten. Unter den heutigen Vertretern dieser Gruppe finden wir Typen, die denen der frühesten Schichten entsprechen, andere, die erst in späteren Perioden der Erdgeschichte auftraten, und endlich solche, die erst in neueren Zeiten in die Erscheinung getreten sind. Wenn wir die lebenden Formen miteinander vergleichen in bezug auf ihre Hauptcharaktere, und wenn wir die erlangten Ergebnisse in Beziehung setzen zu den verwandten Fossilien, so wird es außerordentlich wahrscheinlich, daß die Schlüsse, die man so betreffs der Abstammung der Filicales zieht, richtig sind.

Es ist nun zunächst erforderlich festzustellen, welches die Kriterien sind, nach denen die Vergleichung der Filicales zum Zweck einer phyletischen Anordnung geschehen soll, und Klarheit zu erlangen über den relativen Wert der verschiedenen Kriterien. Der Wert eines Merkmals wird natürlich in erster Linie abhängen von seiner Konstanz durch lange Reihen hindurch, mit kleinen progressiven Aenderungen. Diese kleinen Aenderungen sind von besonderer Wichtigkeit, wenn wir sehen, daß zwei oder mehr Charaktere in parallelen Linien sich fortentwickeln. Wenn weiter diese Charaktere physiologisch unabhängig voneinander sind, so ergeben sie noch gewichtigeres phyletisches Beweismaterial. Wir werden unten sehen, daß uns eine allmählich zunehmende Menge solchen Beweismaterials heute zur Verfügung steht, das genügt, um wenigstens eine Skizze der wahrscheinlichen Leitlinien der Stammesgeschichte der Filicales zu liefern, wenn es auch noch zu dürftig ist für ein bis ins einzelne vollständiges Schema.

Diese Methode bedeutet aber nichts anderes als die Durchführung des „natürlichen Systems", dessen Gesichtspunkte bei der Einteilung der Blütenpflanzen schon praktisch verwertet sind, auch für die Filicales. Die Einteilung dieser letzteren erfolgte zu lange auf sehr beschränkter Basis. Benutzt wurden hauptsächlich Einzelheiten im Bau der reifen Sori und der Sporangien, zu wenig Rücksicht wurde auf die Entwickelungsgeschichte genommen. Dazu sind jetzt noch andere Kriterien gekommen. Im folgenden sind die hier benutzten Charaktere zusammengestellt: 1. Die Beschaffenheit und Gestalt des Sporophyten. 2. Seine Anatomie, besonders das Gefäßsystem. 3. Die Aderung des Blattes, 4. Die epidermalen Anhangsgebilde. 5. Die Merkmale des Sorus, besonders seine Lage und die Anordnung der Sporangien. 6. Die Schutzvorrichtungen des Sorus, besonders das Indusium. 7. Die Struktur des Sporangiums, mit besonderer Berücksichtigung des Annulus und der Sporenproduktion. 8. Die Gestalt und die

Digitized by Google

Häute der Sporen. 9. Die Charaktere der apikalen Meristeme, einschließlich der Primordia der Sporangien. 10. Das Prothallium, seine Gestalt, sein Scheitel und seine Anhangsgebilde. 11. Die Antheridien, einschließlich der Zahl der Spermatocyten. 12. Die Archegonien, ihre Lage und Struktur. 13. Die Embryologie.

Jedes dieser Kriterien soll kurz diskutiert und seine Bedeutung für den Zweck der Vergleichung und phyletischen Anordnung der Filicales gewürdigt werden. Und späterhin soll der Versuch gemacht werden, dieselben zu gebrauchen zur Aufdeckung der Richtlinien, welche die Entwickelung der Filicales befolgte.

1a) Beschaffenheit und Gestalt des Sporophyten. Was Gestalt und Beschaffenheit betrifft, ist der Sporophyt der Filicales zusammengesetzt aus Einheiten, die einfache Sprosse darstellen; das Blatt ist groß im Verhältnis zur Achse und vielfach fein gefiedert. Die Pflanzen sind im wesentlichen megaphyll. Damit geht Hand in Hand die Einrollung des Blattstieles im Jugendzustand, so daß das Ganze aussieht wie ein Bischofsstab (Fig. 1). Das hängt zusammen mit dem apikalen Wachstum, das für alle Farnblätter bemerkenswert ist; denn durch die Einrollung werden die jüngsten Gewebe nach außen hin geschützt. Der Sproß kann radiär sein, das ist z. B. der Fall bei den aufrechten Typen, die ihre höchste Ausbildung in den Baumfarnen erreichen (Fig. 1). In anderen Fällen ist der Sproß dorsiventral: dann liegt die Achse schief oder horizontal (Fig. 4). Der radiäre Typus dürfte der primitivere, der dorsiventrale dagegen der abgeleitete sein. Möglich ist, daß im Laufe der Stammesgeschichte wieder holt ein Wechsel von aufrechten zu kriechenden Formen, und umgekehrt, stattgefunden hat. Am Sproß des kriechenden Typus sind die Blätter durch lange Internodien getrennt, während bei den aufrechten Formen die Blätter dicht gedrängt beieinander stehen. Manchmal dringen die fortwachsenden Sprosse in den Boden ein als Rhizome, wie beim Adlerfarn; in anderen Fällen nehmen sie das Aussehen von Ranken an, wie bei Acrostichum scandens. Diese Umwandlungen haben wohl ihre biologische

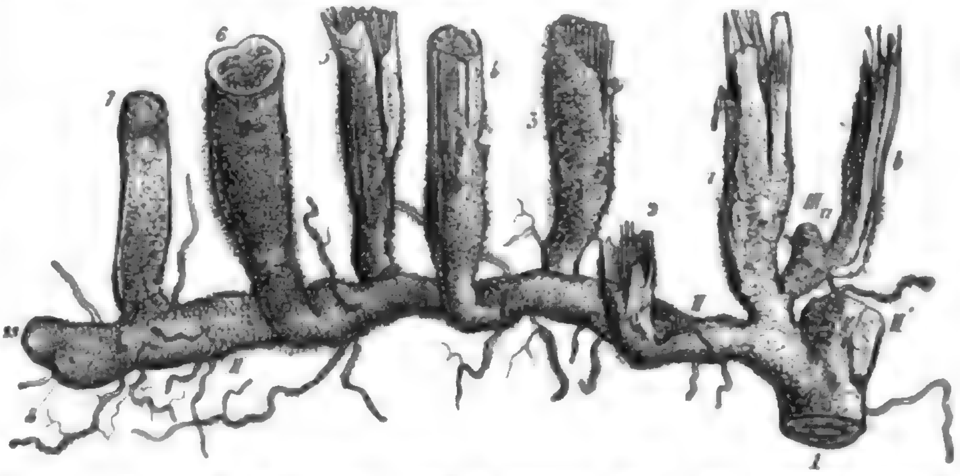


Fig. 4. Ein Teil des unterirdischen Stammes eines dorsiventral gebauten Farnes, Pteridium aquilinum (L.) Kuhn, mit Blättern und Blattstielbasen. In ½ natürlicher Größe. Aus Sachs' Lehrbuch.

Bedeutung, doch sind es wahrscheinlich späte, abgeleitete Zustände. Dasselbe gilt für den kletternden Habitus, den einige Farnblätter zeigen. Die Gattung Lygodium zeigt das besonders; hier bleibt die Achse unterirdisch und die Blattspindeln stellen drahtartige Gebilde von unbegrenztem Wachstum dar, die an Sträuchern und Bäumen hinaufwinden; daran sitzen die Fiederblättchen in kurzen Abständen. In vielen Fällen finden wir bei Blättern und Sprossen der Farne biologische Anpassungen, die den Verhältnissen, wie wir sie bei den höheren Blütenpflanzen antreffen, entsprechen.

Bei manchen Farnen stellt der einfache Sproß die ganze Pflanze dar. Bei anderen dagegen treten Vervielfachungen auf, sei es durch terminale Verzweigung oder durch die Bildung von Adventivknospen an verschiedenen Stellen der Achse und der Blätter. Auf diese Weise kann die Zahl der Sproßscheitel vermehrt werden und das einzelne Individuum an Umfang und Ausdehnung gewinnen. Die terminale Verzweigung ist meistens dichotom und ist für die primitiveren Formen (vgl. Fig. 53) charakteristisch.

1b) Vergleichende Anatomie der Sporophyten (Gefäßsystem). Die vergleichende Anatomie, besonders auch des Gefäßsystems, erweist sich von Tag zu Tag als wichtigerer Faktor für die phyletische Betrachtungsweise der Filicales. Die Gründe dafür sind einmal darin zu suchen, daß wir bei den Filicales starke Unterschiede in der Anordnung der Leitungsbahnen finden, sodann in der Erkenntnis, daß ein bestimmtes Fortschreiten von einfacheren zu komplizierteren Stadien im Laufe der Stammesentwickelung stattgefunden hat. Zudem gehen diese fortschreitenden Abänderungen parallel mit solchen bei anderen, ganz verschiedenen Merkmalen. Man darf aber bei der Behandlung ana-

Digitized by Google

tomischer Fragen nicht vergessen, daß bei jeder progressiven Entwickelung die Struktur des Gefäßsystems durch die äußere Gestaltung bedingt wird und ihr folgt, nicht aber umgekehrt. Ferner: der strukturelle Effekt irgendeiner Entwickelung kann erhalten bleiben, selbst wenn die formativen Wirkungen, mit welchen er ursprünglich im Zusammenhang stand, sich geändert haben oder ganz verschwunden sind. Die anatomischen Charaktere folgen nur langsam der fortschreitenden Entwickelung und können lange auf demselben Zustand beharren. Sie haben eine Art phyletischen Beharrungsvermögens. Nach diesen Bemerkungen, die für alle Pteridophyten gelten, wollen wir zu der vergleichenden Untersuchung des Gefäßsystems der Filicales übergehen.

Eine Fortentwickelung des Gefäßsystems zeigt sich am meisten in einer Abspaltung selbständiger Gefäßstränge, die sowohl im Stamm als im Blatt getrennt verlaufen. Ganz allgemein deutet ein einfacher Gefäßstrang in der Achse oder im Blatt auf einen relativ primitiven Zustand hin, wogegen eine große Zahl getrennter Stränge für den abgeleiteten Zustand charakteristisch ist. Aber es kann auch Reduktion eintreten, so daß wieder einfache Typen entstehen, die von den primitiven nur schwer zu unterscheiden sind.

Betrachten wir zuerst die Achse, so sehen wir in den einfachsten Fällen den Sproß durchzogen von einem marklosen Gefäßbündelkern (Fig. 5): in der Mitte ist das Xylem, das zusammengesetzt ist aus treppenförmigen Tracheiden, mit oder ohne eingestreutem Parenchym. Um jenes herum schließt sich ein Ring von Phloem, der seinerseits wieder umgeben ist von einer Pericykelscheide. Der Abschluß nach außen geschieht durch eine Endodermis. Dieses ganze Gefäßsystem, eingebettet in das umgebende Gewebe, heißt die Stele; der eben geschilderte primitive Typus wird als protostel bezeichnet, womit eben gesagt sein soll, daß er die einfachsten Verhältnisse darstellt. Man findet ihn bei den alten Farnfamilien der lebenden Gleicheniaceae und Schizaeaceae, und bei den fossilen Botryopteriadeae. Er tritt auch auf in den jungen Pflanzen verschiedener Farnfamilien, bei denen er im erwachsenen Stadium nicht mehr zu finden ist. Das stimmt überein mit der Rekapitulationstheorie.

Im Laufe der phyletischen Fortentwickelung nahm die Stele an Größe zu. Bei gewissen Typen entstand ein markartiger Kern, das Gefäßsystem wurde zum markhaltigen monostelen. Wir finden das bei relativ primitiven Farnen mit aufrechter Achse, wie bei den fossilen und zuletzt bei den rezenten Osmundaceae (s. Kidston und Gwynne-Vaughan, Fossile Osmundaceae). Jedoch dieses Stadium war weiteren Komplikationen unterworfen durch das Eindringen von Parenchym (s. unten).

Eine dritte Form der Anordnung ist charakteristisch für die kriechenden Rhizome. Querschnitte durch ein Internodium eines solchen zeigen das Gefäßsystem als vollständigen Ring, der ein zentrales Grundgewebe umschließt. Der Ring besteht aus einer Mittelzone von Xylem, die beiderseits

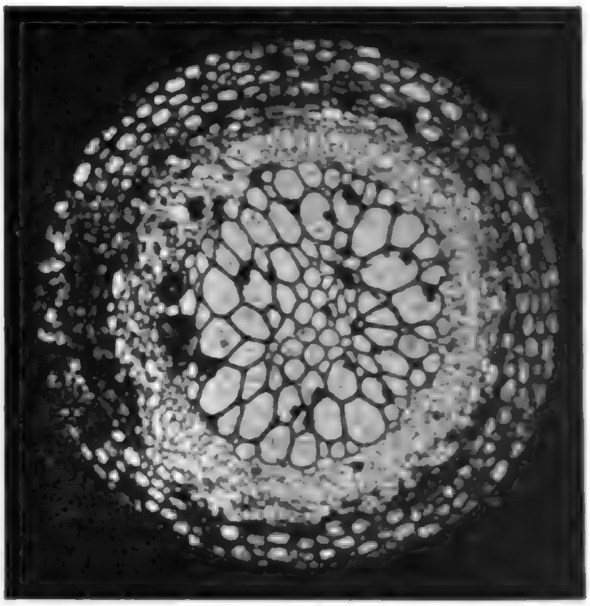


Fig. 5. Botryopteris cylindrica. Photographie eines Querschnittes durch das paläozoische Fossil. Der solide Xylemkern mit endarchem Protoxylem ist umgeben von einem sehr gut erhaltenen Phloemband. Der Bau ist typisch protostel.

sukzessive umgeben ist von Phloem, Pericykel und Endodermis. Dieser Aufbau wird von Jeffrey als amphiphloisch siphonostel bezeichnet, oder als solenostel, von Gwynne-Vaughan. Er ist entstanden durch das Eindringen des Blattpolsters in die Stele, gerade über der Insertion jedes Blattes. Gehen diese Gewebsstücke weit genug nach oben und unten, so daß sie in der Längsachse miteinander in Verbindung treten, so erhalten wir einen markartigen Kern, der bei jeder Blattinsertion mit der Rinde in Verbindung steht durch eine Oeffnung, die Blattlücke genannt wird (Fig. 6).

Wo die Internodien lang sind, stehen diese Blattlücken in einem gewissen Abstand voneinander. Wo sie aber kurz sind, nämlich in den Fällen, wo das Rhizom sich aufrichtet und die Blätter dichter gedrängt stehen, überlagern sich die Blattlücken und die ganze Stele nimmt das Aussehen eines offenen

Digitized by Google

Netzwerkes an, sie heißt **dictyostel**. Das sehen wir typisch bei Dryopteris (Nephrodium) filix mas; der Querschnitt zeigt eine Anzahl von Gefäßsträngen (**meristel**), die ringförmig angeordnet sind. Diese Anordnung finden wir gewöhnlich bei den aufrechten Farnstöcken der Jetztzeit (Fig. 7).

Schließlich können weitere Komplikationen noch auf zwei Arten entstehen: einmal durch Bildung akzessorischer Stränge innerhalb oder außerhalb des stelären Komplexes. Beispiele hierfür sind das Rhizom von Pteridium aquilinum (Fig. 8), oder die Stöcke der Cyatheaceae. Dann aber auch dadurch, daß noch weitere Lücken gebildet werden, oder Perforationen des meri-

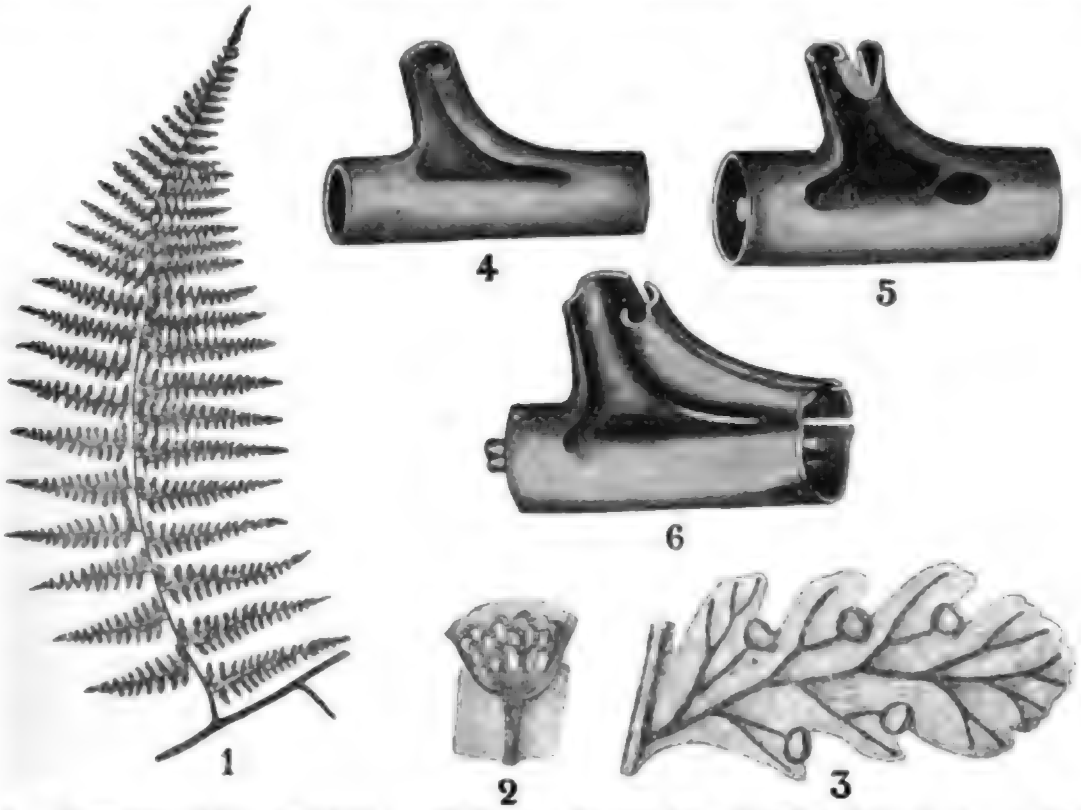


Fig. 6. Dennstaedtia apiifolia. Habitus, Sporangien, Gefäßbündelverlauf. 1 Blattfieder erster Ordnung. 2 und 3 Dennstaedtia cicutaria. Nach Baker. 2 Längsschnitt eines Sorus. 3 Fertiles Fiederchen. 4 bis 6 Anatomie. Nach Gwynne-Vaughan. 4 Dennstaedtia punctiloba. Diagramm des Rhizoms, einen Knoten mit der Basis einer Blattspur zeigend. 5 Dasselbe von Dennstaedtia apiifolia. 6 Dasselbe von Dennstaedtia rubiginosa.

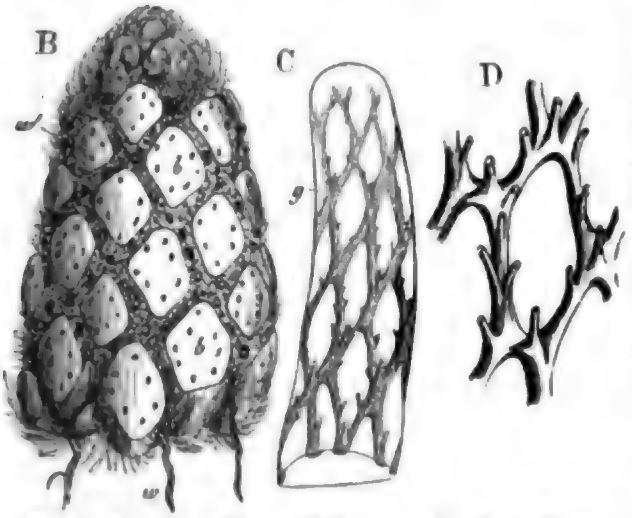


Fig. 7. Nephrodium Filix mas. L. B ein Stammende, dessen Blattstiele abgeschnitten sind. b Blattstielquerschnitte, w Wurzeln. C ebensolches Stammende, Bündelnetz (dictyostel) durch Abschälung der Rinde bloßgelegt. D Masche des Netzes (Blattlücke) mit den Ansätzen der Bündel. Aus Sachs' Lehrbuch.

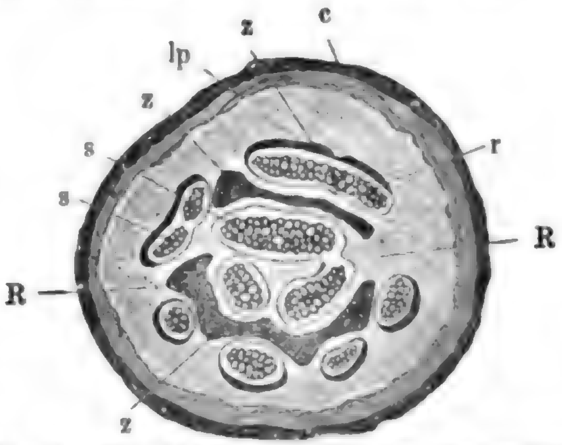


Fig. 8. Pteridium aquilinum. Querschnitt durch das Rhizom. s konzentrische Meristelen, l sklerenchymatische Platten, lp Zone der Sklerenchymfasern, R Rinde, e Epidermis. Vergrößerung 7 fach. Nach Strasburger.

Digitized by Google

stelen Aufbaues, durch die dann die größeren Meristelen in noch kleinere Gefäßstränge aufgeteilt erscheinen. Eine Vergleichung zeigt deutlich, daß wir eine fortschreitende Entwickelung haben vom protostelen Stadium bis zu weitgehender Zerlegung des Gefäßsystems in Einzelstränge im Stamm der Farne.

Eine parallele Entwickelung finden wir in den Blättern der Farne. Bei den ältesten Typen besteht die Blattspur aus einem einzigen fortlaufenden Gefäßstrang, der jedoch bei den ausgestorbenen Botryopterideae und Zygopterideae sehr komplizierte Formen annahm.

Bei den primitiven Typen der heute lebenden Farne ist dieser Strang seitlich erweitert zu einem riemenförmigen Gebilde, das auf Querschnitten hufeisenförmig gebogen erscheint. Fortgeschrittenere Formen zeigen denselben aufgelöst in kleinere Stränge, deren Anordnung noch erkennen läßt, daß sie zusammen den einzigen, gebogenen Strang darstellen, von welchem sie herzuleiten sind. Eine gleiche Aufteilung ist durch die Rachis bis in die Fiedern hinein zu sehen (Fig. 9, 10)

Was die Gewebselemente betrifft, welche die Gefäßbündel zusammensetzen, so ist eine weitgehende Uebereinstimmung bei den Filicales zu beobachten. Die Hauptmasse des Xylems machen die Treppen-Tracheiden aus, die ihren Namen von den transversal verlängerten, parallel angeordneten Tüpfeln haben, die den Wänden ein treppen- oder leiterförmiges Aussehen verleihen. Das Phloem besteht der Hauptsache nach aus Siebröhren, die oft beträchtliche Weite haben. Die zahlreichen Siebplatten sind auf den Seitenwänden und zeigen so eine den Tracheiden bis zu einem gewissen Grade analoge Struktur.

Die anderen Gewebsarten, die zum Aufbau des Sprosses beitragen, sind in ihrer Verteilung zu variabel, als daß sie eine sichere Basis zur Vergleichung liefern könnten. Das gilt besonders für das Sklerenchym, das oft, aber nicht immer, dunkel gefärbte Stränge bildet, deren Lage und Anordnung gewöhnlich in naher Beziehung zu den Gefäßbündeln steht (Fig. 8).

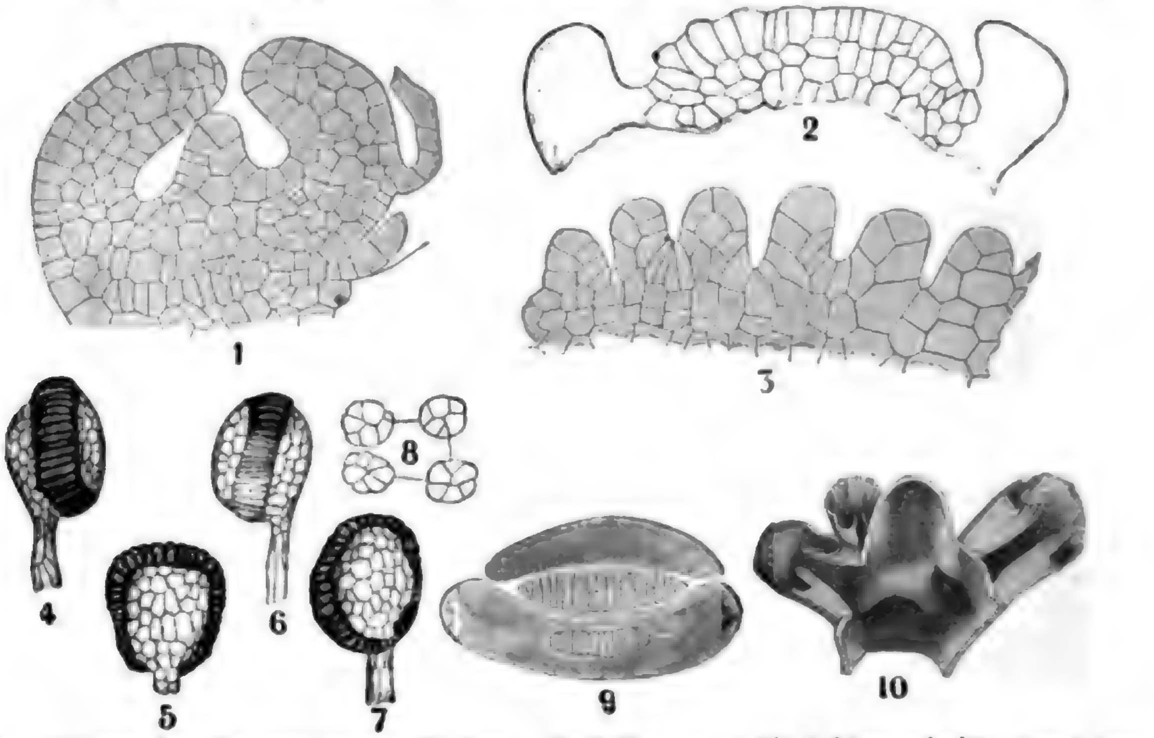


Fig. 9. Dicksonia. Sporangienentwickelung. Nach Bower. 1 bis 3 Längsschnitte durch junge Sori von Dicksonia Schiedei Baker. 9 Querschnitt durch einen jungen Sorus, die beiden Lippen des Indusiums zeigend. 4 bis 7 Sporangien von Dicksonia Menziesii, von vier verschiedenen Seiten gesehen. 8 Querschnitte durch Sporangienstiele. 10 Dicksonia Barometz. Nach Gwynne-Vaughan. Teil der Stammstele von innen gesehen, die Abzweigung von drei Blattspuren zeigend.

1c) Aderung des Blattes. Beobachtungen über die Aderung der Blattflächen der Farne haben gegenüber der Untersuchung innerer anatomischer Charaktere den Vorteil, daß sie mit der Lupe gemacht werden können und ohne Zuhilfenahme von Schnitten. Die Aderung wird zur Vergleichung der Farne schon sehr lange benutzt. So bildete sie einen Hauptbestandteil der Methode von Presl, in seinem „Tentamen Pteridographiae" (1836). Desgleichen wurde dieses Merkmal systematisch verwendet von Mettenius (Filices Horti Lipsiensis 1856). Neuere vergleichende Untersuchungen zwischen der Aderung lebender

Digitized by Google

und fossiler Formen hatten das Ergebnis, daß einige der geprüften Typen relativ alt und primitiv, andere dagegen neueren Ursprungs sind und abgeleitete Formen dar-

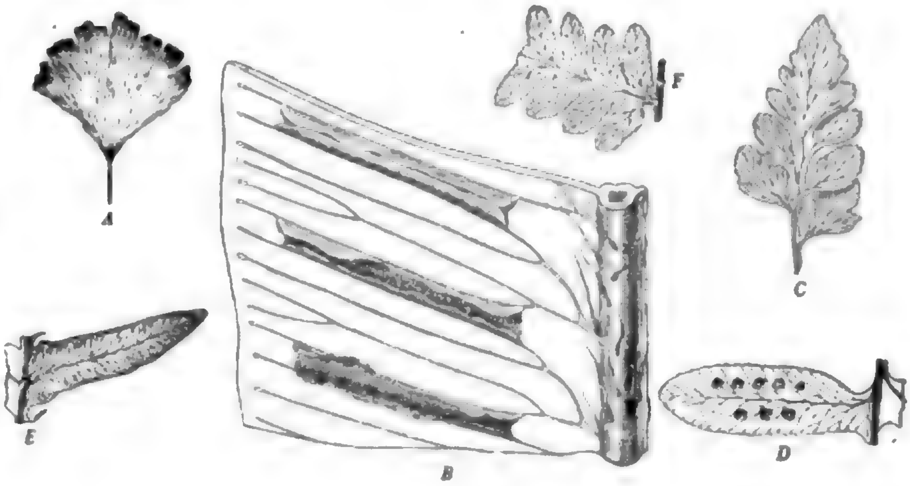


Fig. 10. Relativ primitive Typen der Aderung. A von Adiantum capillus veneris (Venatio Cyclopteridis). B von Scolopendrium vulgare (Venatio Taeniopteridis). C Blattsegment I. Ordnung von Asplenium adiantum nigrum (Venatio Sphenopteridis). D von Polypodium vulgare (Venatio Eupteridis). E von Pteridium aquilinum (Venatio Neuropteridis). F von Dryopteris Filix mas (Venatio Pecopteridis). Nach Luerssen.

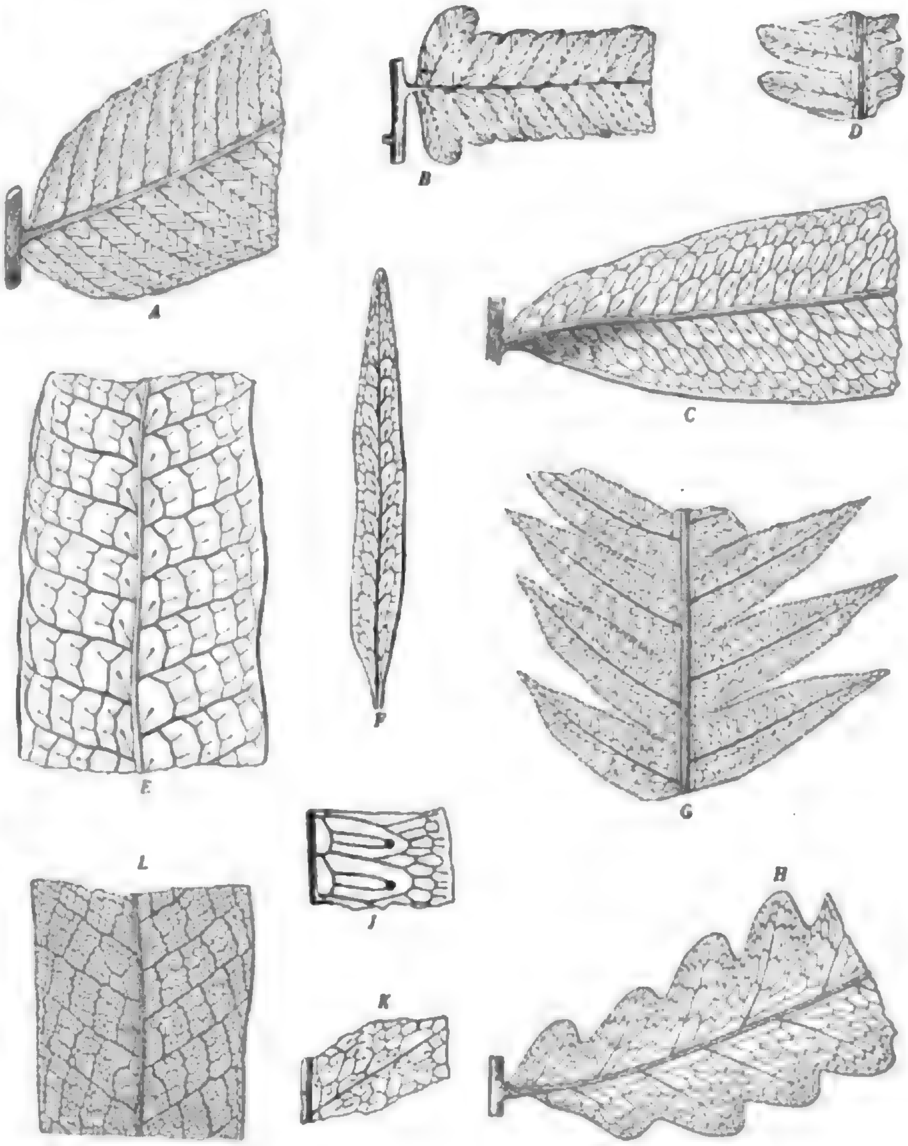


Fig. 11. Höhere Typen der Aderung, mit anastomosierenden Adern. A und B Venatio Goniopteridis. A Teil eines Blattsegmentes von Meniscium reticulatum Sw. Natürliche Größe. B Teil eines Sekundärsegmentes von Asplenium esculentum Pr. Natürliche Größe. C Teil eines Blattsegmentes von Polypodium nereifolium Schk. (Venatio Goniophlebii). D Teil eines Segmentes I. Ordnung des Blattes von Hemitelia grandifolia Spr. (Venatio Pleocnemiae). ½ natürliche Größe. E Teil eines Blattes von Polypodium caespitosum Lk. (Venatio Cyrtophlebii). F Blatt von Polypodium serpens Sw. (Venatio Marginariae). G Teil aus einem Primärsegmente von Woodwardia radicans Sw. (Venatio Doodyae). H Teil eines Blattes von Onoclea sensibilis L. (Venatio Sageniae). J Teil eines Blattes von Polypodium sporodocarpum W. (Venatio Phlebodii). K Teil eines Blattes von Polypodium crassifolium L. (Venatio Anaxeti). L Teil eines Blattes von Polypodium quercifolium L. (Venatio Drynariae). Nach Luerssen, Farnpfanzen.

stellen. Die Resultate solcher V rgleichungen sind von Potonié (Engler und Prantl, Natürliche Pflanzenfamilien I, 4, S. 480ff.) zusammengestellt worden. Für den Typus der Archaeopterides ist danach charakteristisch eine fächerförmige Aderung mit gegabelten Adern, ohne Mittelrippe in den Fiederchen. Er ist vertreten vom Kulm an abwärts. Der Typus der Sphenopterides und Pecopterides, charakteristisch für Karbon und Perm, zeigt eine Mittelrippe im Fiederchen, aber noch gegabelte Adern. Die Netzaderung tritt zum erstenmal auf in der Flora 5 (middle Coal Measures) und nimmt in höheren Schichten an Häufigkeit zu. Der fortgeschrittenste Typus ist ausgezeichnet durch ein engmaschiges Netzwerk, er erscheint zum erstenmal in der mesozoischen Periode. Aus solchen Zusammenstellungen fossiler Typen und deren Vergleichung mit heute lebenden Formen kann für die Filicales festgestellt werden: daß eine gegabelte Aderung ohne Verschmelzungen einen primitiven Zustand andeutet (Fig. 10); daß eine Aderung mit gelegentlichen Verschmelzungen eine Mittelstellung der betreffenden Formen erweist; und daß endlich ein kleinmaschiges Netzwerk von Adern eine relativ fortgeschrittene phyletische Stellung kennzeichnet (Fig. 11). Das Vorwiegen der gegabelten Aderung ohne Fusionen bei den Marattiaceae, Osmundaceae, Schizaeaceae, Gleicheniaceae stimmt mit obigen Schlüssen überein.

1d) Epidermale Anhangsgebilde. Zu den epidermalen Anhangsgebilden der Farne sind zu zählen die Haare, mit oder ohne Drüsen, und flache Schuppen, Spreuschuppen oder Ramenta genannt. Oft in ungeheurer Menge und nicht selten beide zugleich vorhanden, bilden sie eine flockige oder spreuige Umhüllung der jungen Teile der Pflanze, um dann später abgeworfen zu werden. So bilden sie einen Schutz nicht nur gegen extreme Temperaturen, sondern auch gegen zu starke und unzeitige Verdunstung. Diesen Zwecken dienen die Ramenta natürlich viel wirksamer als die Haare, und man darf deshalb wohl annehmen, daß sie eine phyletisch jüngere Erwerbung sind als diese (Fig. 12).

Die Richtigkeit dieser Annahme wird noch wahrscheinlicher durch die Tatsache, daß wir bei den Botyropterideae Haare finden gerade so wie bei den lebenden Marattiaceae, Osmundaceae, den meisten Schizaeaceae und gewissen Gleicheniaceae. So sehen wir, daß in der Regel die niederen Typen Haare tragen, die höher stehenden dagegen Schuppen. Aber man darf kaum, wie Kühn das versucht hat, alle Polypodiaceae nach diesem Merkmal einteilen (Die Gruppe der Chaetopterides 1882). Es wird unten gezeigt werden, daß die Entwickelung von den Haaren zu den Spreuschuppen mehrmals in verschiedenen Formenreihen vor sich gegangen ist. Man kann also nur bei Vergleichung nahverwandter Formen schließen, daß Gattungen oder Arten, die Haare tragen, primitiver sind als jene, die Schuppen tragen. Die Tatsache, daß der Uebergang von dem einen zum anderen zusammengeht mit der Fortentwickelung anderer Charaktere, zeigt die Richtigkeit dieser Ansicht.

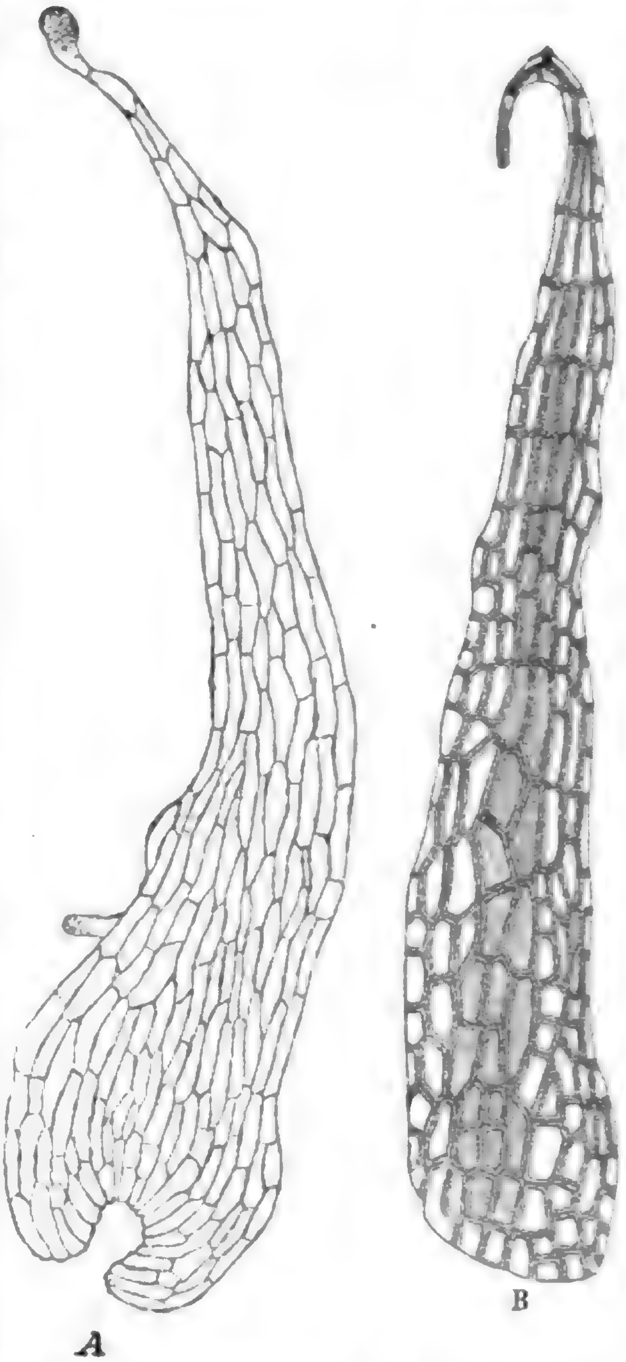


Fig. 12. A Spreuschuppe von Cystopteris fragilis. B Spreuschuppe von Asplenium viride. Vergrößerung etwa 20fach. Nach Sadebeck.

1e) Stellung der Sori. Lage und Anordnung der Sporangien. Die Beschaffenheit der Sori ist schon immer bei der Einteilung der Farne benutzt worden. Bei Organen, deren

Bau so variabel ist wie hier, ist besonders Wert auf die Eigenschaften zu legen, die durch lange Reihen relativ konstant bleiben. Einer der wichtigsten dieser Charaktere ist die Lage des Sorus. Bei gewissen Botryopterideae wie bei der modernen Osmunda bedecken die Sori die Oberfläche und den Rand eines sehr zusammengezogenen Sporophylls. Das war wahrscheinlich der primitive, undifferenzierte Zustand. Aber bei einigen anderen frühen Formen nahmen die Sori eine oberflächliche Stellung an der Unterseite des Sporophylls ein, wie bei den Marattiaceae und Gleicheniaceae, und dieser Zustand ist streng aufrecht erhalten bei den Matonineae, den Cyatheaceae (Fig. 13) mit ihren Abkömmlingen wie Dryopteris usw. und verwandten Formen wie Woodsia und Onoclea, und endlich auch bei den Pterideae. Bei anderen sind die Sori streng randständig: die erstgebildeten Sporangien entspringen direkt vom Rande des Blattes (Fig. 14). Diese Stellung ist sehr konstant bei den Schizaeaceae, den Hymenophyllaceae, Dicksonieae und Davallieae, obgleich bei den letzten Abkömmlingen der letzteren ein Uebergang vom Rand auf die Unterseite vorkommt. Abgesehen hiervon finden wir eine große Konstanz in der Stellung der Sori bei den genannten Familien, und man muß diejenigen mit randständigen (marginalen) und jene mit flächenständigen (superficialen) Sori als verschiedene Gruppen trennen.

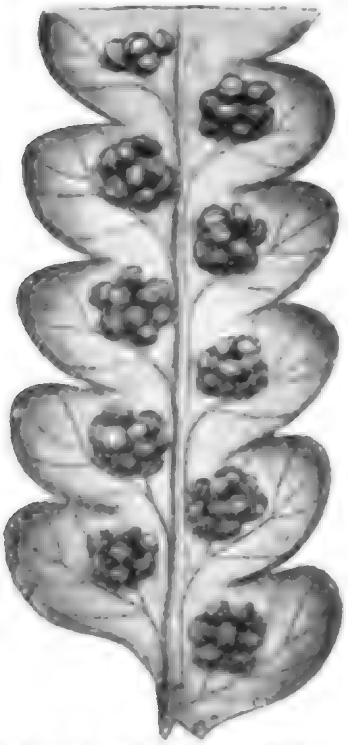


Fig. 13. Teil eines Fiederblättchens von Lophosoria quadripinnata Gmel., mit superfizialen Sori, die Sporangien jedes Sorus vom gleichen Alter.

Ein zweites Merkmal, das bislang wenig beachtet wurde, ist die Anordnung der Sporangien im Sorus, und die damit eng zusammenhängende Reihenfolge ihres Erscheinens. 3 Typen sind zu unterscheiden: die Simplices, bei denen die Sporangien eines Sorus alle simultan gebildet werden (Fig. 13); die Gradatae, mit ganz bestimmter basipetaler Reihenfolge (zeitlich und räumlich) in der Erzeugung der Sporangien (Fig. 15); und die Mixtae, mit zeitlicher, aber nicht räumlicher Aufeinanderfolge (Fig. 16). Diese 3 Typen fallen annähernd, vielleicht sogar genau, zusammen mit 3 aufeinanderfolgenden geologischen Zeitaltern. So waren die Simplices hauptsächlich oder vielleicht sogar ausschließlich vertreten in der paläozoischen Periode; die Farne der mesozoischen Periode setzen sich zusammen aus jenen und einem großen Teil der Gradatae, und die große Masse der neueren Farne ist charakterisiert durch den gemischten Typus der Sori (Mixtae). Mögen auch diese 3 Typen im allgemeinen mit den 3 großen Perioden der Erdgeschichte koinzidieren, so darf man doch nicht annehmen, daß jede phyletische Reihe sich notwendig über sie alle erstrecken müßte. Zu erkennen ist mehr eine allgemein steigende Entwickelung, die in vielen Reihen zum Ausdruck kommt, als irgendein einzelner Fortschritt.

1f) Schutzvorrichtungen des Sorus. Indusium. Die primitivsten Farne haben alle nackte Sori, d. h., nachdem das eingerollte Blatt sich im Laufe des Wachstums gestreckt hat, sodaß der Selbstschutz aufhört, liegen die Sporangien frei da, ohne irgendwelchen eigenen Schutz (Fig. 13). Aber bei vielen der späteren und der abgeleiteten Typen treffen wir Schutzvorrichtungen, welche die jungen Sporangien bedecken Diese werden mit dem Namen Indusium bezeichnet (Fig. 2).

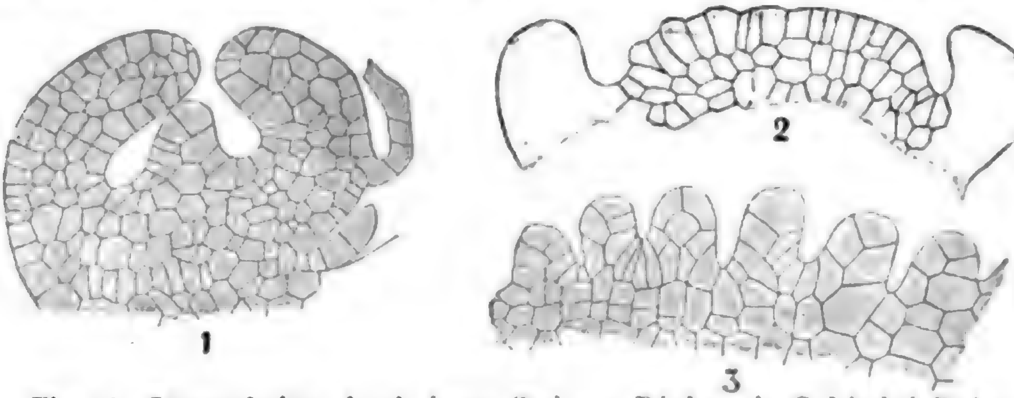


Fig. 14. Längsschnitte durch junge Sori von Dicksonia Schiedei Baker.

Es ist oft angenommen worden, daß das

Indusium, obwohl es bei verschiedenen Farngruppen verschiedene Gestalt und Lage annimmt, doch phyletisch durchweg das gleiche Organ ist, d. h. daß es eine morphologische Wesenheit ist.

Diese Ansicht ist schon a priori unwahrscheinlich: denn es existierten verschiedene Typen mit nackten Sori, ehe Indusien in die Erscheinung traten, und es ist kein Grund anzunehmen, daß der Schutz bei allen genau in derselben Weise bewirkt worden ist. Außerdem sind die Unterschiede in der Lage, im Bau und im Wachstum der Indusien bei verschiedenen Farntypen derartige, daß eine phyletische Gleichwertigkeit ausgeschlossen ist. Es sind bereits mehrere verschiedene Typen von Indusien festgestellt worden, und es ist möglich, daß mit fortschreitender Untersuchung noch weitere erschlossen werden. Bis jetzt haben wir folgende:

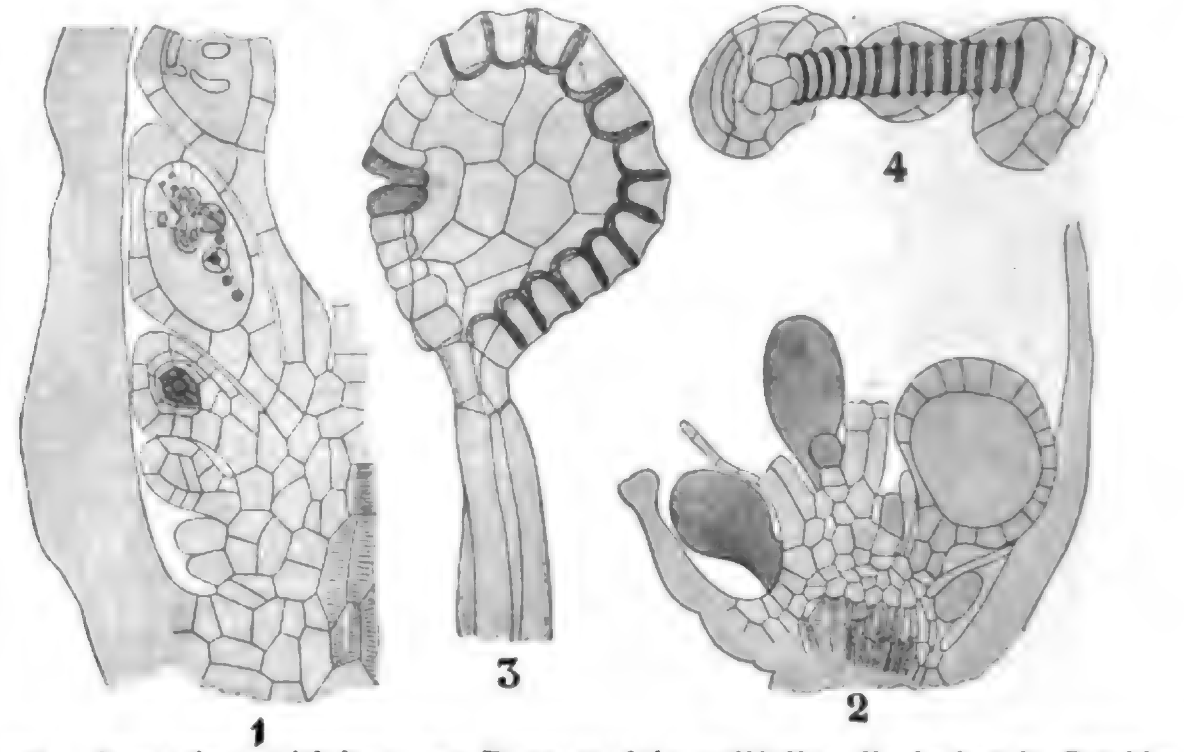


Fig. 15. Sporangienentwickelung von Dennstaedtia apiifolia, die basipetale Entwickelungsfolge der Sporangien zeigend. Nach Bower. 1 Sorus mit rein basipetaler Entwickelungsfolge. 3 aufspringendes Sporangium derselben, den sehr wenig schiefen Annulus zeigend. 2 und 4 Dennstaedtia rubiginosa Kaulf. 2 Sorus, zeigend, daß die Entwickelungsfolge zunächst basipetal war, später aber gemischt wurde. 4 aufgesprungenes Sporangium desselben, zeigend, daß der Annulus beiderseits vor der Insertionsstelle des Stieles aufhört.

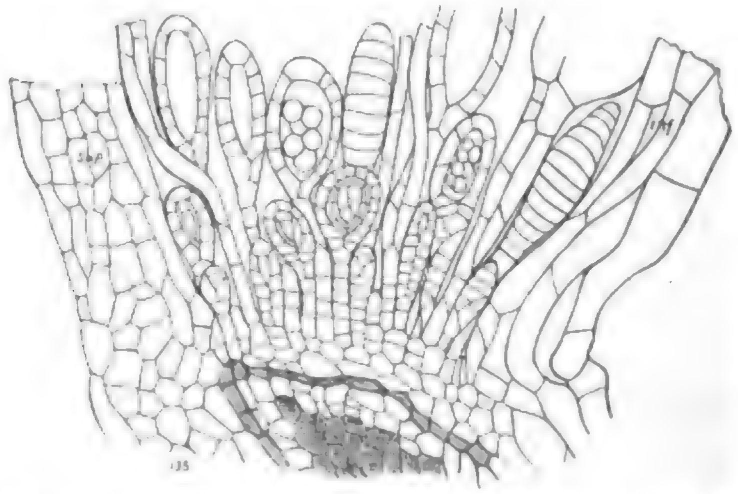


Fig. 16. Längsschnitt durch einen älteren Sorus von Davallia Griffithiana mit Sporangien verschiedenen Alters. 100fach vergrößert.

α) Den Typus von Matonia. Dieses Genus steht allein unter verwandten Formen; es hat oberflächlich gelagerte Sori, die geschützt sind durch eine schirmartige Bedeckung. Diese fehlt bei den Gleicheniaceae (von denen dieses Phylum wahrscheinlich abstammt), und bei dem lebenden Dipteris und dem fossilen Laccopteris. Wir haben es hier wahrscheinlich mit einer Neubildung zu tun, die entstanden ist durch Wachstum von der Mitte des Receptakulums aus (Fig. 17, 4, 15).

β) Bei den Cyatheaceengenera Lophosoria und Alsophila sind die Sori nackt, so wie bei dem elterlichen Gleicheniaceentypus (Fig. 13). Bei Hemitelia

Digitized by Google

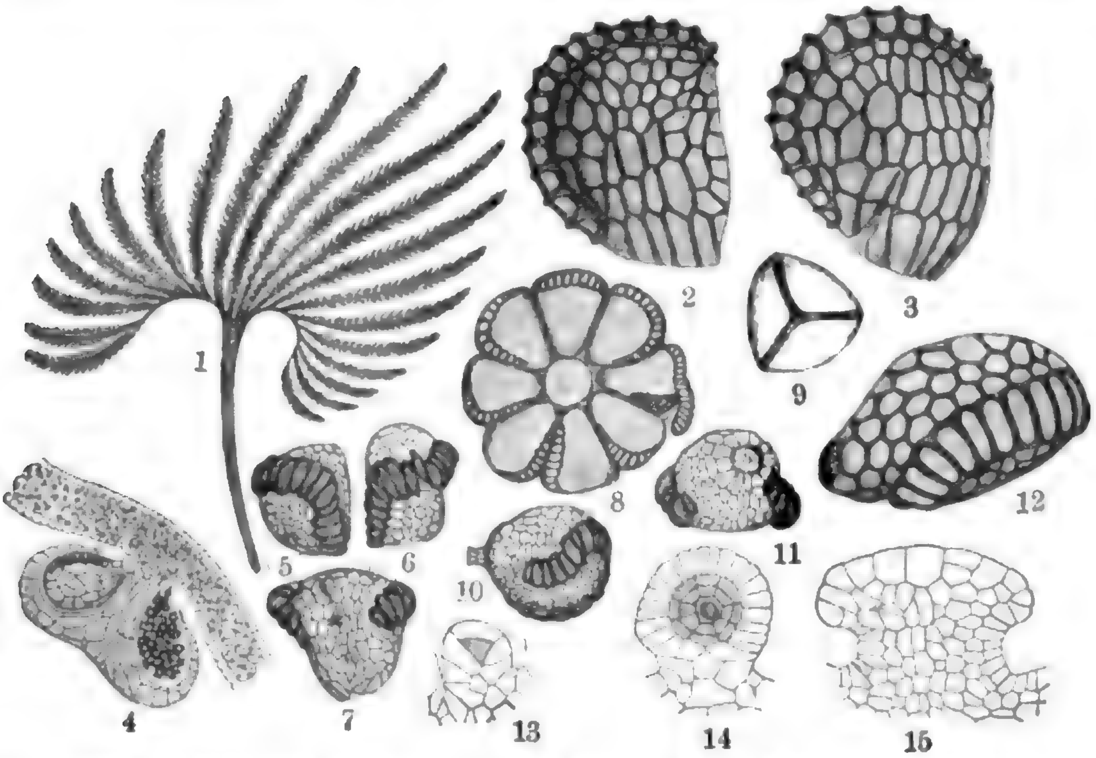


Fig. 17. 1 Blatt von Matonia pectinata. Nach Diels. 2, 3, 12 Sporangien von verschiedenen Seiten. Nach Diels. 9 Spore. Nach Diels. 4 Längsschnitt durch den Sorus. Nach Diels. 5 bis 8, 10, 11, 13 bis 15 Entwickelung der Sporangien. Nach Bower.

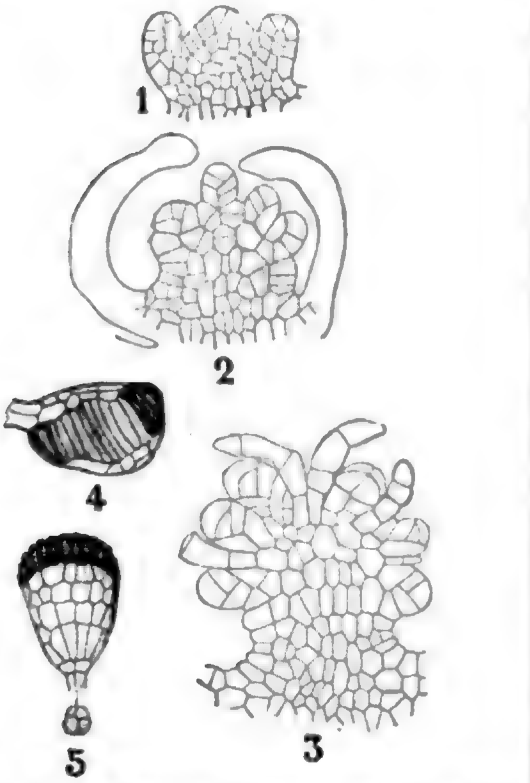


Fig. 18. Sporangienentwickelung von Alsophila und Cyathea. Nach Bower. 1 und 2 Cyathea dealbata Sw. 1 Längsschnitt eines sehr jungen Sorus, die Anlage der Placenta und des Indusiums zeigend. 2 älteres Stadium, die basipetale Entwickelungsfolge der Sporangien zeigend. 3 Alsophila atrovirens, junger Sorus, geringe Andeutung einer basipetalen Entwickelungsfolge der Sporangien zeigend. 4 und 5 Sporangien von Alsophila excelsa, unterhalb 5 ein Querschnitt des Sporangiumstiels.

jedoch sind sie halb und bei Cyathea ganz umschlossen von einem basalen, häutigen Indusium, das wir auch wiederfinden bei Woodsia, Onoclea, Peranema u. a. Bei Cystopteris und bei Dryopteris überwölbt das Indusium einseitig den Sorus, und bei Polystichum erscheint es distal am Receptaculum. In allen diesen Fällen ist das Indusium wahrscheinlich von der Natur eines spezialisierten Ramentums (Fig. 18).

γ) Der Typus der Pterideae hat oberflächlich gelagerte Sori, die vom Rande des Blattes überwölbt werden. Die Uebergänge von dem breiten, flachen Blatt mit oberflächlichen Sori bis zu dem verschmälerten fertilen Blatt, mit umgebogenem und oft häutigem Rande lassen deutlich den Ursprung des marginalen Indusiums erkennen (Fig. 19).

δ) Der Typus von Pteridium ist dadurch ausgezeichnet, daß er außer dem marginalen Indusium anderer Pterideae noch ein intramarginales Indusium besitzt; die Vergleichung mit verwandten Formen ergibt, daß letzteres durch die innige laterale Verflechtung zahlreicher Haare entstanden ist (Fig. 20).

ε) Der Typus der Farne mit echt marginalen Sori, vertreten bei den Schizaeaceae, Hymenophyllaceae, Dicksonieae und Davallieae, zeigt akzessorische Wachstumsgebilde von verschiedener Gestalt, die sich nach Ursprung und Entwickelung als Neuformationen erweisen, entstanden durch

Digitized by Google

Auswachsen von Geweben der Blattoberfläche (Fig. 14).

Wir haben also gesehen, daß sich mindestens 5 verschiedene Arten der Entstehung der mit dem Sammelnamen Indusium bezeichneten Schutzvorrichtungen verfolgen lassen. Infolgedessen kann dieses Wort nur in dem allgemeinen Sinne gebraucht werden, als damit Gebilde bezeichnet werden sollen, die zum Schutze der Sporangien im Sorus entwickelt worden sind. Was sie gemeinsam haben, ist einzig ihre Funktion und ihr gewöhnlich zarter Aufbau.

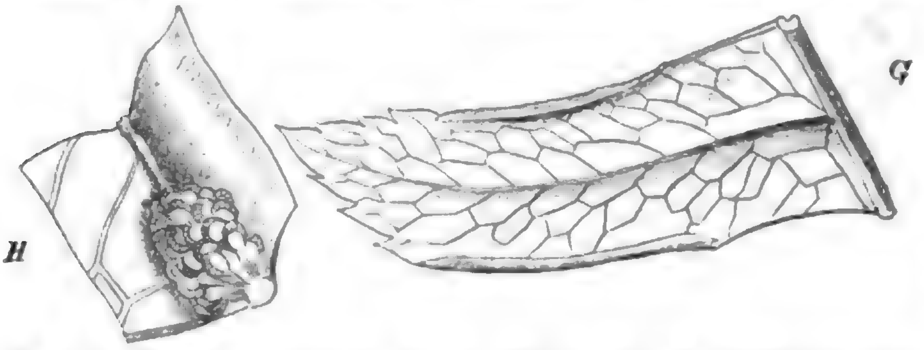


Fig. 19. Pteris aculeata Sw. G Fieder mit Fruktifikation und Deckrand. H Teil derselben, stärker vergrößert. Nach Dies.

ɪg) Die Struktur der Sporangien. Die Sporangien sind das wichtigste in dem Sorus: und da sie bei den heute lebenden Farnen in jedem vollständigen Entwickelungsgang eines Individuums konstant auftreten, so folgt, daß sie durch die ganze Stammesentwickelung der Filicales hindurch vorhanden gewesen sein müssen. Ihre Struktur bildet deshalb ein Hauptkriterium der Vergleichung, und zwar schon seit sehr langer Zeit. Diese ist jedoch sehr variabel sowohl in Größe, Gestalt und Bau, als auch in der Zahl der gebildeten Sporen. Die bestehenden Unterschiede liefern eine sehr wichtige Unterlage für die phyletische Betrachtung der Filicales.

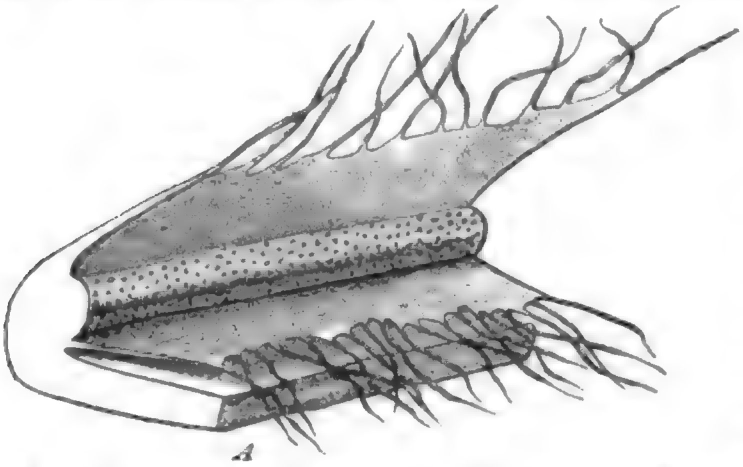


Fig. 20. Pteridium aquilinum (L.) Kühn; Rezeptakulum mit den beiden indusialen Bedeckungen. Nach Luerßen.

Es war gebräuchlich, die beiden Typen der Leptosporangiatae und der Eusporangiatae zu unterscheiden, je nach der Entstehung der Sporangien aus einer oder mehreren Elterzellen. Aber vergleichende Beobachtungen zeigen, daß diese Unterschiede nur graduell sind. Der Uebergang vom einen zum anderen ist durch die Diagramme der Figur 21 a bis g dargestellt, die die ersten Teilungen zur Bildung der Sporangien bei verschiedenen Farntypen zeigen, von den Marattiaceae bis zu den Polypodiaceae. Es wird nun allgemein angenommen, daß die massigeren Eusporangiaten phylogenetisch älter sind, und daß die Farne mit kleineren Sporangien spätere und abgeleitete Typen darstellen. Die Zahl der in einem Sporangium gebildeten Sporen ergibt annähernd ein Maß für die Masse und den Umfang des Sporangiums selbst. Sehr große Sporenzahlen sind schätzungsweise gefunden worden in den

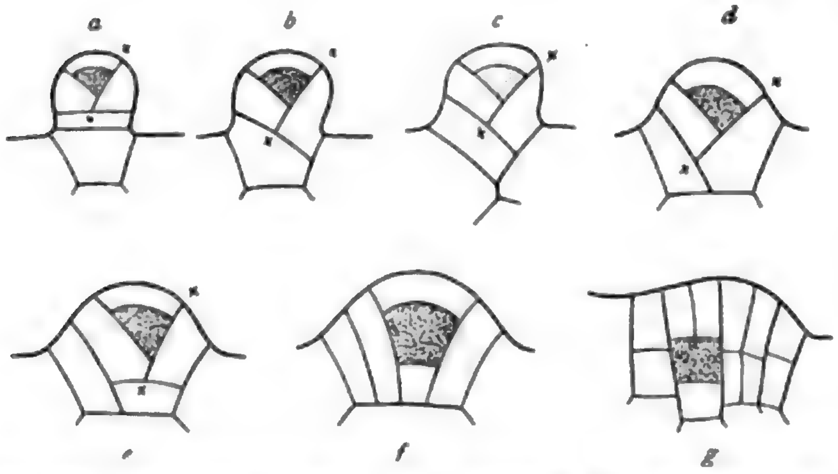


Fig. 21. Diagramme, welche die Teilungen der Sporangien bei verschiedenen Farnen zeigen. a Polypodiaceae, b Ceratopteris, c Alsophila, d Schizaea, e Thyrsopteris oder Trichomanes, e, f Todea, g Angiopteris.

Digitized by Google

großen Sporangien der Marattiaceae: z. B. 1500 bei Angiopteris oder 7500 bei Kaulfussia; andere Simplices wie Gleichenia und Osmunda mit ungefähr 500 oder Lygodium und Todea mit ca. 250 Sporen nehmen eine mittlere Stellung ein; bei den Polypodiaceae endlich, die im wesentlichen moderne Typen sind, ist die Zahl der Sporen eines Sporangiums gewöhnlich 64 oder 48 und kann heruntergehen bis auf 24 oder 16.

Wir sehen also im Gefolge der fortschreitenden Entwickelung eine Reduktion der Sporenzahl. Damit geht Hand in Hand eine zunehmende Spezialisierung des Annulus, jenes Ringes aus mechanisch wirksamen Zellen, der die Ausstreuung der reifen Sporen veranlaßt. Bei den eusporangiaten Farnen, einschließlich der frühen Botryopterideae, erscheint das mechanische Gewebe als ein breiter Ring, der über das distale Ende der Sporangienkapsel hinwegläuft. Es besteht aus mehreren Zellreihen, und es scheint, daß der vielreihige Annulus der vorherrschende, wenn auch nicht der ausschließliche Typus in der paläozoischen Periode war. Durch Uebergänge hindurch kann die Vereinfachung des Annulus verfolgt werden bis zu dem Zustande, wie wir ihn bei den modernen Polypodiaceae antreffen, wo er aus einer einzigen Reihe weitspezialisierter Zellen besteht (Fig. 22).

Bei den eusporangiaten Farnen erfolgte die Oeffnung durch einen medianen Längsriß. Mediane Dehiszenz finden wir auch bei den primitiven Farnen, von denen leptosporangiate Reihen, wie die Osmundaceae, abstammen (Fig. 22 E). Sie wurde gewöhnlich bewirkt durch einen Annulus, der schief war (Helicogyratae) wie bei Gleichenia. Aber bei dieser Art des Aufspringens, wie sie für die Simplices charakteristisch ist, brauchen die Sporangien einen gewissen Spielraum; sie ist also nicht geeignet für einen dichten Sorus. Dementsprechend finden wir in den Fällen, in denen — wie bei den Gradatae — zahlreiche Sporangien in basipetaler Reihenfolge stehen, eine laterale Dehiszenz, die aber noch durch einen schief verlaufenden Annulus bewirkt wird. Die Sporangien konnten sich so vom Receptakulum schief nach außen hin öffnen, wie das Figur 22 B, C andeutet. Die laterale Dehiszenz kann für einen phyletischen Fortschritt gehalten werden; zusammen mit dem schiefen Annulus charakterisiert sie die Gradatae. Einen weiteren Schritt vorwärts sind die Mixtae, der Typus unserer heutigen Farne. Bei ihnen ist die basipetale Entstehungsfolge der Sporangien wieder ersetzt durch die dicht gedrängte Anordnung mit einer Mischung der verschiedensten Altersstufen, und alle Sporangien sitzen auf einem flachen Receptakulum. Der Annulus hat eine vertikale Lagerung angenommen (Cathetogyratae) (Fig. 22 A), die laterale Dehiszenz ist beibehalten. So können sich die Sporangien vom Receptakulum vertikal nach außen hin öffnen. Auf diese Weise finden also die angenommenen Stufenfolgen der phyletischen Fortentwickelung des Sporangiums eine gute biologische Erklärung. Ueberdies koinzidieren dieselben mit den paläontologischen Tatsachen. Man kann demnach zusammenfassend schließen: das primitive Sporangium war eusporangiat und erzeugte viele Sporen; es zeigte longitudinale Dehiszenz und einen gewöhnlich vertikalen Annulus aus mehreren Zellreihen. Ein mittlerer Zustand weist kleinere Sporangien mit geringerem Sporenerträgnis auf, die lateral aufspringen und einen schiefen Annulus aus einer einzigen Zellreihe besitzen. Das Sporangium der phyletisch am höchsten stehenden Farne ist relativ klein und erzeugt wenig Sporen; es hat einen vertikalen Annulus, aus einer einzigen Zellreihe gebildet, und zeigt laterale Dehiszenz durch einen transversalen Riß.

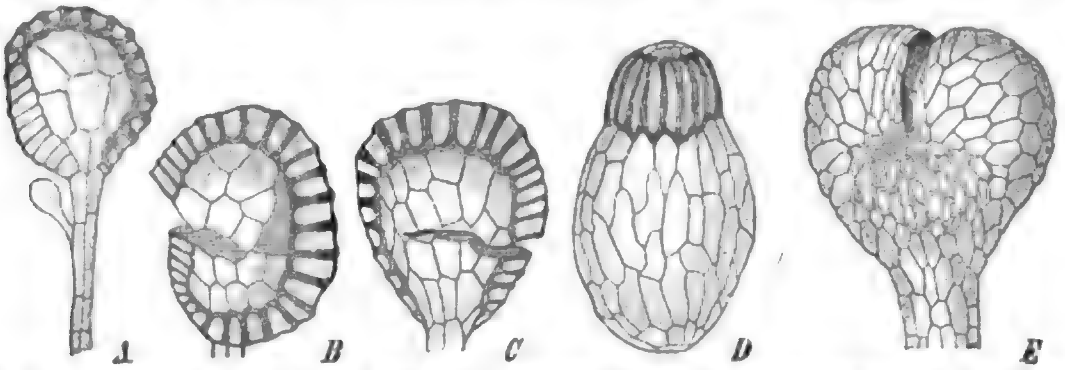


Fig. 22. Sporangien. A Dryopteris (Nephrodium) Filix mas; an der Basis ist ein Drüsenhaar. B, C Alsophila armata, von zwei Seiten gesehen. D Aneimia caudata. E Osmunda regalis. A bis D 70 fach vergrößert, E 40 fach. Aus Strasburgers Lehrbuch.

ɪh) Gestalt und Häute der Sporen. Die Gestalt der Sporen und die die Sporen umschließenden Häute sind gut untersuchte

Charaktere, die sich sehr für diagnostische Zwecke eignen. Hinsichtlich der Gestalt der Sporen lassen sich zwei Haupttypen erkennen: der radiäre und der bilaterale. Der erstere ergibt sich aus der tetraedrischen Teilung der Sporenmutterzelle; er ist gekennzeichnet durch seine annähernde Kugelform, 3 konvergierende Linien markieren den Punkt, wo vor der Teilung die Mitte der Sporenmutterzelle lag. Die bilateralen Sporen entstehen, wenn die Sporenmutterzelle sich in 4 Quadranten teilt; bei der Reife sind sie leicht nierenförmig. Der radiale Typus ist charakteristisch für die Osmundaceae, Hymenophyllaceae und für viele Pterideae und Schizaeaceae. Unter letzteren, wie auch bei den Gleicheniaceae, finden sich gewisse Arten mit bilateralen Sporen. Diese Unterschiede können deshalb nicht als allgemeine Kriterien verwendet werden; sie haben jedoch ihren Wert bei der Vergleichung von Formen innerhalb engerer Verwandtschaftskreise.

Die Häute der Sporen zeigen oft eine eigentümliche, oberflächliche Zeichnung von diagnostischem Wert. Wenn auch bei einigen Farnen die Sporenwand glatt ist, so finden wir doch bei vielen dieselbe außen gezeichnet durch Vorsprünge und Linien, die bei der Vergleichung gut verwendet werden können. Das könnte wohl noch in ausgiebigerem Maße geschehen als bisher. Noch mehr gilt das für diejenigen Strukturen, welche auf die Entwickelung eines Perisporiums um die normale Wand herum zurückzuführen sind. Hannig (Flora 1911, S. 321) hat ein solches gefunden bei den Aspidiaceae und den Asplenìaceae, bei den meisten anderen Farnen jedoch soll es fehlen. Da es innerhalb offenbar natürlicher Gruppen Ausnahmen hinsichtlich Gestalt und Zeichnung der Sporen gibt, so muß man mit der Benutzung dieser Merkmale als Kriterien vorsichtig sein.

11) Apikale Meristeme und Primordien der Sporangien. Die apikalen Meristeme und die Primordien der Sporangien, die sich ganz ähnlich verhalten, ergeben ein Kriterium der Vergleichung, daß bis jetzt nie genug gewürdigt worden ist. Es kann hierbei die anfängliche Organisation jedes Teiles des Sporophyten in Betracht gezogen werden. In Nummer 7 haben wir gesehen, daß das massive Primordium der Sporangien bei den Marattiaceae ganz allmählich übergeht in die sukzessiv immer weniger massiven der Polypodiaceae. Das ist symbolisch überhaupt für alle Meristeme der betreffenden Farne. Eine vergleichende Untersuchung der apikalen Regionen der Achse, des Blattes und der Wurzel ergibt, daß in allen diesen Teilen die Marattiaceae einen relativ komplizierten Zustand darstellen, insofern die Gewebe sich in ihrer Entstehung zurückverfolgen lassen in der Regel auf eine Gruppe von 3 oder 4 Initialen, gewöhnlich von prismatischer Gestalt (Fig. 23 A). Damit sind zu vergleichen die Teilungen zur Bildung des massiven Sporangiums (Fig. 21 g), die auch nicht auf eine einzige Zelle zurückzuführen sind. Dagegen finden wir bei den Typen der Polypodiaceae in Stamm, Blatt und Wurzel jeweils eine einzige Initiale von kegelförmiger Gestalt, die bestimmte Teilungen eingeht, so daß das ganze Gewebe eines jeden Organs von seiner einen Initialen herstammt (Fig. 23 B). Auch hier finden wir

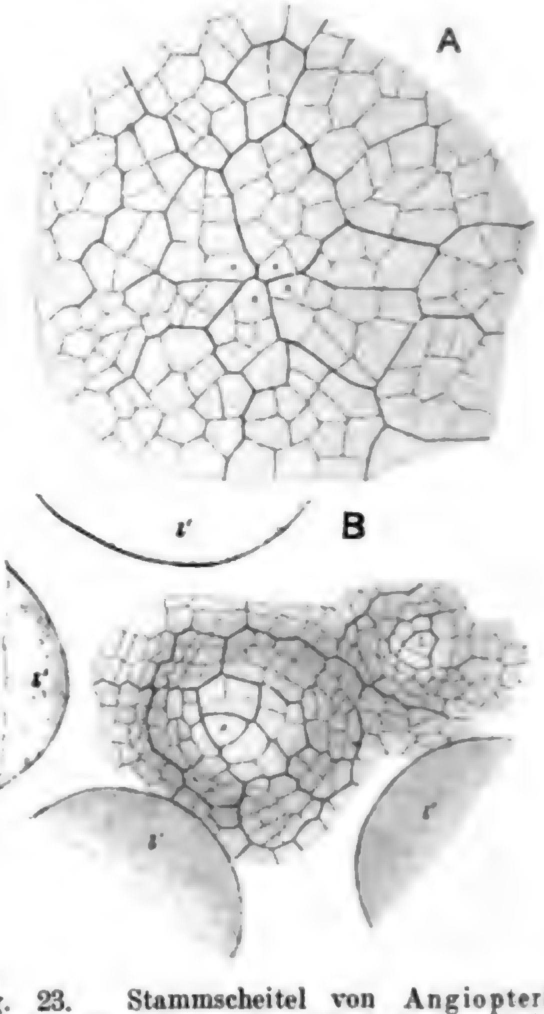


Fig. 23. Stammscheitel von Angiopteris evecta. Von oben gesehen. Es sind augenscheinlich 4 Initialen (x, x) vorhanden. B Scheitel von Osmunda regalis. Von oben. l, l Blätter; die jüngsten zeigen auch eine dreiseitige Initiale.

die gleichen Verhältnisse wieder bei den Teilungen des Sporangiums; das ganze Sporangium der Polypodiaceae geht aus einer einzigen Zelle hervor (Fig 21 a). Zwischen diesen beiden Extremen können gewisse frühe Farntypen eingereiht werden. Von diesen sind bemerkenswert die Osmundaceae, deren Wurzeln nicht konstant eine einzige Initiale aufweisen, während das Blatt eine dreiseitige Scheitelzelle hat an Stelle der einfacheren zweiseitigen. Diese Mittelstellung zwischen den Extremen zeigt

Digitized by Google

sich auch bei den Teilungen des Sporangiums der Osmundaceae (Fig. 21 e, f), das zwischen den Typen der Marattiaceae (Fig. 21 g) und der Polypodiaceae steht (Fig. 21 a).

Am einfachsten und überzeugendsten wird das vielleicht demonstriert durch die Flügel oder Ränder der Blätter (Fig. 24). Bei den Marattiaceae zeigt ein Schnitt durch den massiven Rand, daß die Gewebe desselben nicht auf eine einzige Randzelle zurückgeführt werden können (Fig. 24 A). Bei den Osmundaceae ist es ähnlich (Fig. 24 B). Ein Querschnitt durch das Blatt der Polypodiaceae ergibt dagegen, daß dort alle Zellen durch regelmäßige Teilungen mittels schiefer Wände aus einer einzigen Randzelle hervorgehen (Fig. 24 C). Die häutigen Hymenophyllaceae zeigen besondere Verhältnisse; bei ihnen finden sich in der Regel sehr einfache marginale Teilungen (Fig. 24 D).

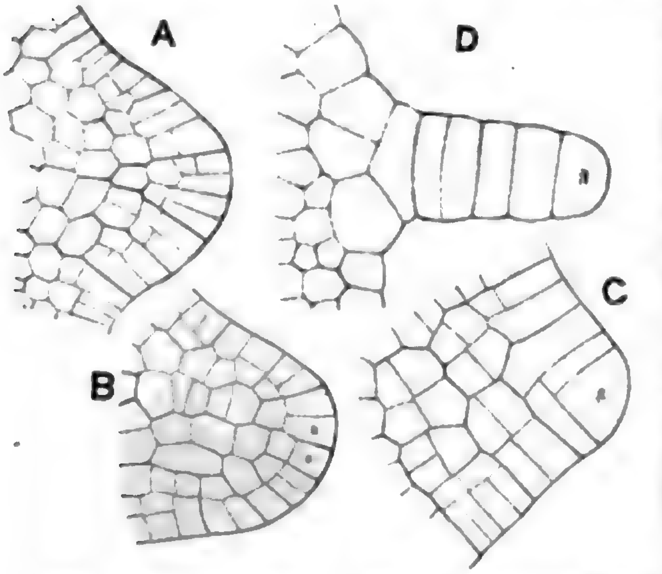


Fig. 24. Querschnitte durch die jungen Blattflügel verschiedener Farne. A Angiopteris evecta, mit einem kleinzelligen Meristem am Flügelrande, nicht nur einer einzigen Randzelle. B Todea barbara, mit ähnlichem Bau. C Scolopendrium vulgare, regelmäßige alternierende Teilungen einer Randzelle (m) zeigend. D Trichomanes radicans, eine Randzelle (m) mit transversalen Teilungen zeigend.

Bei den meisten Farnen finden wir diese Gleichartigkeit der Teilungen der Scheitel und der Sporangien mit großer Konstanz beibehalten; wir erkennen in ihr eine Tatsache der allgemeinen Organisation, die phyletischen Abänderungen unterworfen war im Sinne einer Entwickelung von komplizierteren zu einfacheren und regelmäßigeren Methoden. Jedoch zeigen die Ophioglossaceae eine Abweichung hiervon, die wir bei keiner anderen Abteilung der Filicales wiederfinden. Bei ihnen sind die Teilungen des Blattes und des Sporangiums ähnlich denjenigen der Marattiaceae in ihrer komplizierteren Art, während die Scheitel des Stammes und der Wurzel je eine einzige Initiale aufweisen, gerade wie die leptosporangiaten Farne. Dieser Widerspruch kann erklärt werden durch die Annahme einer progressiven, immer massigeren Modifikation des Blattes und des Sporangiums bei Pflanzen, die von einem den Ophioglossaceae und Botryopterideae ähnlichen Typus herstammen; damit hängt auch der eigentümliche Habitus der Ophioglossaceae zusammen.

1 k) Prothallium. Das Prothallium, die Gametophytgeneration der Farne, ist in dem Artikel „Fortpflanzung der Pflanzen (Pteridophyta)" kurz beschrieben. Dort ist dazu als Beispiel genommen das Prothallium von Dryopteris (Nephrodium) Filix mas; dieses stellt den bei den Polypodiaceae gewöhnlichsten Typus dar, wie er im Freien unter normalen Bedingungen wächst. In Kulturen wird die Verteilung der Geschlechtsorgane modifiziert. Schlecht ernährte Prothallien werden fast fadenförmig, und ganz allgemein kann man sagen, daß die weniger gut ernährten Antheridien erzeugen, die besser ernährten dagegen Archegonien. Bei normalen Prothallien kommt das in der Regel so zur Geltung, daß zuerst Antheridien und dann Archegonien gebildet werden. Sonach handelt es sich hier um Merkmale, die für die Vergleichung nur mit der nötigen Vorsicht zu gebrauchen sind.

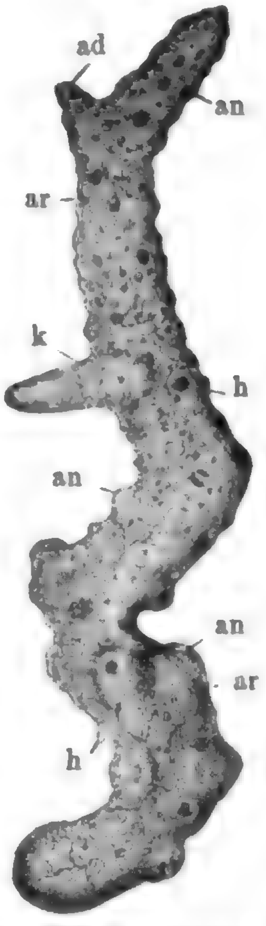


Fig. 25. Prothallium von Ophioglossum vulgatum. an Antheridien, ar Archegonien, k junge Pflanze mit der ersten Wurzel, ad Adventivzweige, h Pilzhyphen. Nach Bruchmann. Aus Strasburger.

Nichtsdestoweniger gibt es gewisse Typen von Prothallien, die sich von dem der Polypodiaceae unterscheiden und ziemlich konstant bei den betreffenden Farnfamilien auftreten. So ist z. B. das Prothallium der Marattiaceae sehr groß und trägt die Geschlechtsorgane auf einer fleischig verdickten Mittelrippe. Das der Osmundaceae ist ähnlich gebaut. Bei

Digitized by Google

den Ophioglossaceae leben die massiven, gewöhnlich farblosen Prothallien unterirdisch, die Ernährung wird besorgt durch eine Mykorrhiza (Fig. 25). Sie sind wahrscheinlich herzuleiten von einem Typus ähnlich dem der Marattiaceae, die saprophytische Lebensweise ist eine Neuerwerbung. Aus dem Gesagten ergibt sich, daß die Eusporangiaten, die durchweg eine verhältnismäßig massige Organisation ihres Sporophyten zeigen, auch ein ziemlich massiges Prothallium besitzen.

Andererseits gibt es Farne mit band- ja selbst fadenförmigen Prothallien. Wir finden sie hauptsächlich unter den Hymenophyllaceae, aber auch bei gewissen Schizaeaceae und bei Vittaria. Den extremsten Fall stellt Trichomanes dar, bei welchem das vegetative Gewebe des Prothalliums mit einer grünen Fadenalge zu vergleichen ist; der einzige massive Teil ist der Archegoniophor (Fig. 26). Dieser Zustand stimmt

Fig. 26. Trichomanes rigidum. Teil des Prothalliums mit einem Archegoniophor, an welchem noch eine junge Pflanze sitzt. Nach Goebel.

überein mit dem dünnen und zarten Bau des Blattgewebes bei Trichomanes, und es scheint also, daß die Anpassung an extreme Feuchtigkeit zu einem permanenten Merkmal bei beiden Generationen geworden ist. Die Tatsache, daß die Gestalt des gewöhnlichen Polypodiaceenprothalliums unter wechselnden Lebensbedingungen sich leicht ändert, schließt Vergleichungen, die auf die Form des Prothalliums gegründet sind, nicht aus dann, wenn, wie bei Trichomanes, ein Anpassungsmerkmal erblich fixiert ist. So können also, mit der nötigen Vorsicht, Unterschiede in der äußeren Gestaltung der Prothallien zur phyletischen Vergleichung herangezogen werden.

11) Antheridium. Das Antheridium, das männliche Geschlechtsorgan eines gewöhnlichen Farns der Polypodiaceen, ist ein halbkugeliger Körper, der über die Oberfläche des Prothalliums emporragt. Es besteht im wesentlichen aus einer Wand aus tafelförmigen Zellen, die eine Menge kleinerer Zellen, die Spermatocyten, umgibt. Aus jeder der letzteren entsteht bei der Reife ein Spermatozoid (Fig. 27). Eine Vergleichung der

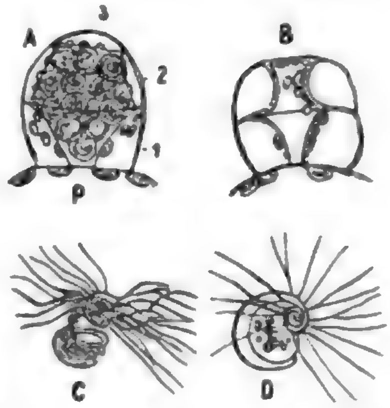


Fig. 27. Polypodium vulgare. A reifes Antheridium. B entleertes Antheridium. C, D Spermatozoiden. Nach Strasburger.

Antheridien verschiedener Farntypen ergibt, daß Unterschiede in der Struktur und den Proportionen vorhanden sind, die immer den Charakteren der Sporangien der betreffenden Formen entsprechen. So wie die Sporangien der eusporangiaten Farne charakterisiert sind durch ihre größere Masse, ihren kurzen Stiel — in einigen Fällen sind sie sogar tief in das Gewebe des sie tragenden Blattes eingesenkt —, so sind auch die Antheridien dieser Farne relativ groß und entweder sitzend oder tatsächlich in das Gewebe des Prothalliums eingesenkt. Ein rohes Maß für den Umfang des Antheridiums, oder mehr noch für die Komplexität seiner Struktur, ist numerisch gegeben durch die Zahl der Spermatocyten, die in einem Querschnitt in der Medianebene eines reifen Antheridiums enthalten sind; oder besser noch durch die wirkliche Zahl der Spermatocyten im ganzen Antheridium, obgleich eine genaue Schätzung dieser Zahl in einem großen Antheridium schwierig ist. Es zeigt sich, daß eine ungefähre, nicht numerisch genaue Beziehung besteht zwischen der Zahl der Spermatocyten und der Zahl der Sporen in den Sporangien bei denselben Farnen: und der weniger robuste Charakter der

Digitized by Google

Leptosporangiaten findet seinen Ausdruck auch in den Proportionen ihrer Antheridien.

1m) Archegonium. Der Bau des Archegoniums, des weiblichen Geschlechtsorgans, ist aus Figur 28 ersichtlich. Er ist in dem Artikel „Fortpflanzung der Pflanzen" genauer beschrieben. Die Archegonien verschiedener Farntypen sind nicht genau gleich. Sie unterscheiden sich in dem Halsvorsprung und gewissen anderen Einzelheiten. Auch finden wir wieder eine rohe Beziehung zwischen den Charakteren der Sporangien verschiedener Farne und denjenigen ihrer Archegonien: bei den eusporangiaten Typen kann das Archegonium tiefer in das Gewebe eingesenkt sein als bei den Leptosporangiaten. Obgleich dies ganz allgemein gilt, kann eine auf das Archegonium gegründete Vergleichung nicht so bis ins Einzelne durchgeführt werden wie das für das Antheridium der Fall war. Ohnehin sind die Merkmale beider Organe nicht von hoher Bedeutung für die vergleichende Betrachtung.

1n) Embryo. Der Embryo, welcher aus dem befruchteten Ei (Zygote) hervorgeht,

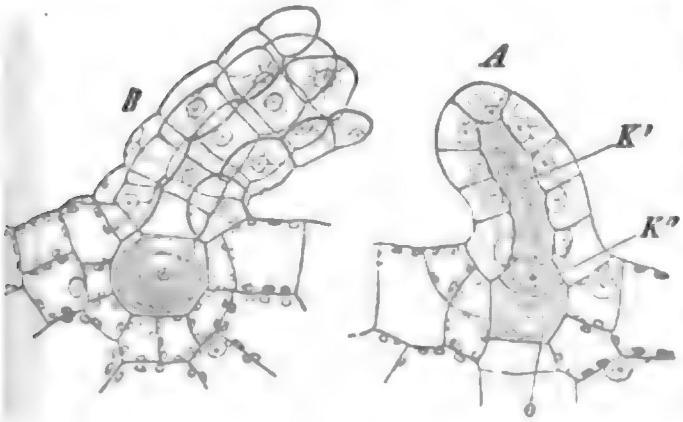


Fig. 28. Polypodium vulgare. A junges, noch nicht geöffnetes Archegonium. K' Halskanalzelle, K'' Bauchkanalzelle, o Eizelle. B reifes, geöffnetes Archegonium. Nach Strasburger.

stellt das Anfangsstadium der neuen Sporophytgeneration oder der Farnpflanze dar. Sein Bau ist für einen typischen, leptosporangiaten Farn in zwei aufeinanderfolgenden Entwickelungsstadien durch Figur 29 A und B gekennzeichnet. Das ältere der beiden Stadien läßt schon die Anfänge der wesentlichen Teile: Stamm, Blatt, Wurzel und Fuß erkennen, sowohl in der äußeren Form als auch in der inneren Struktur. Die Ernährung des Embryos geschieht zunächst mit Hilfe des Fußes, d. h. eines Saugorgans, das eine physiologische Verbindung mit dem elterlichen Prothallium herstellt. Die Figur 29 A gibt ein Bild von den ersten Teilungen des Embryos, durch welche die Initialen von Stamm, Blatt und Wurzel, die bei den Leptosporangiaten charakteristisch sind für diese Organe, entstehen.

Wir haben jedoch schon darauf hingewiesen, daß bei den eusporangiaten Formen gewöhnlich nicht eine einzige Initiale vorhanden ist, und daß dies ein Zeichen der massigeren Organisation dieser relativ frühen Farne ist. Das ist nun auch der Fall bei den Teilungen ihrer Embryonen, die nach einem „massiveren" Plan vor sich gehen. Die Marattiaceae und die Ophioglossaceae zeigen das. Und so sehen wir denn durch den ganzen Lebensgang dieser Farne die derbe Organisation im Gegen-

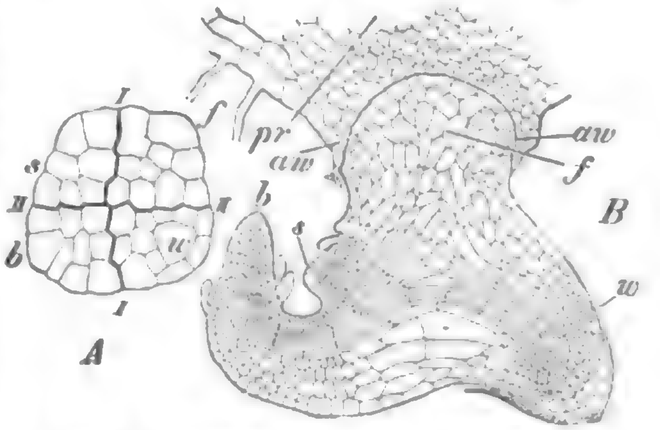


Fig. 29. A Embryo von Pteris serrulata, vom Archegonium befreit. Im Längsschnitt. f Fuß, s Stamm, b erstes Blatt, w erste Wurzel. Nach Kienitz-Gerloff. B ein weiter entwickelter Embryo von Pteridium aquilinum. f Fuß, noch in den erweiterten Archegoniumbauch aw eingebettet, pr Prothallium. Nach Hofmeister.

satz zu der zarteren beibehalten. Die letztgenannte Familie, die am meisten von den übrigen abweicht, fällt durch den Suspensor auf, ein Organ, mit welchem der junge Embryo tief in das Gewebe des massiven Prothalliums eindringt. Wir sehen ihn bei Botrychium obliquum und bei Helminthostachys. Etwas ähnliches ist bei den Marattiaceae und zwar beim Embryo von Danaea beobachtet worden. Dies sind alles relativ primitive Formen. Interessant ist, daß sie uns einen Zustand zeigen, der bei den Filicales selten, dagegen gemein ist bei der sehr niedrig stehenden Reihe der Lycopodiales.

Das Gleichgewicht der Entwickelung der Teile des Embryos ist nun aber Aenderungen unterworfen je nach den biologischen Umständen. Einen extremen Fall, der sehr instruktiv ist, stellt Ophioglossum vulgatum (in geringerem Grade auch Bo-

Digitized by Google

trychium Lunaria) dar, wo der Embryo schleunigst eine frühreife Wurzel bildet, während die Entwickelung der Achse und des Blattes hingehalten wird. Die junge Pflanze wird hier versorgt durch ein ziemlich massives Prothallium, bis die Mycorrhizawurzel fertig ist, um nun die Ernährung zu übernehmen. Dieser Zustand steht in strengem Gegensatz zu dem, was die leptosporangiaten Farne gewöhnlich zeigen. Bei diesen ist ja das Prothallium relativ klein und der Embryo sucht zuerst ein assimilierendes Blatt zu bilden, das die Ernährung übernimmt, zugleich aber ist auch eine Wurzel erforderlich, die das Wasser und die Salze liefert. Solche Unterschiede, die in offensichtlicher Beziehung zu den biologischen Erfordernissen stehen, mahnen zur Vorsicht bei der theoretischen Embryologie. Sie weisen darauf hin, daß der Sporophyt in seinen Anfangsstadien merkwürdig plastisch ist in seinen Proportionen, die sich ändern, entsprechend den direkten Anforderungen des sich entwickelnden Keimlings.

Die Hauptmerkmale, die bei der phyletischen Betrachtung der Filicales benutzt werden können, sind nun angegeben. Sie können unabhängig voneinander benutzt werden und man wird so aus ihnen Schlüsse von einigem Wert ziehen können. Ueberzeugenderes Beweismaterial jedoch für phyletische Schlüsse ergibt sich, wenn eine Parallelität der fortschreitenden Entwickelung zu erkennen ist bei zwei oder mehreren dieser Merkmale. Und je größer die Zahl letzterer ist, und je klarer sie sich auf physiologisch verschiedene Wesenszüge beziehen, um so annehmbarer wird eine daraus hergeleitete Ansicht sein. Man darf jedoch nicht glauben, daß Parallelität hinsichtlich aller Kriterien herrscht. Der Mangel derselben führt oft zu Meinungsschwierigkeiten. In solchen Fällen kann das paläontologische Beweismaterial die Entscheidung geben, so weit es zur Verfügung steht. Denn es liefert positive Tatsachen gegenüber bloßen einander entgegenstehenden Meinungen. Aber auch hier ergeben sich Schwierigkeiten, sodaß die Beweisführung oft auf „negativer Evidenz“ beruht. Der Mangel an paläontologischen Urkunden von einer gegebenen Form aus einem bestimmten geologischen Horizont beweist ja nicht notwendig, daß diese Form überhaupt nicht existierte zu der Zeit, als jene Schichten sich ablagerten. Man muß immer die Unvollkommenheit der geologischen Urkunden berücksichtigen. Vieles wird ungewiß bleiben: und in Wirklichkeit steckt diese Erweiterung der phyletischen Methode noch in den Kinderschuhen. Die jetzt gezogenen Schlüsse bezüglich der Filicales können freilich in späteren Zeiten revidiert werden; das eine aber kann mit Bestimmtheit versichert werden, daß diese Methode, so unvollkommen durchgeführt sie auch sein mag, doch eine durchaus gesunde und gründliche ist. Und wie schon anfangs bemerkt, eignet sich keine Pflanzengruppe besser für diese Art der Betrachtung als gerade die Filicales. Die Anordnung der nun folgenden kurzen Beschreibung der Hauptfamilien der Filicales entspricht denn den Folgerungen, die aus einer Untersuchung nach den dargelegten Gesichtspunkten sich ergeben.

A. Simplices.

Darunter sind zu verstehen alle diejenigen Farne, bei denen die Sporangien, die in einem Sorus vereinigt sind oder aber sonst in naher Beziehung zueinander stehen, alle simultan gebildet werden, so daß sie alle ungefähr von gleichem Alter sind. Mit diesem Merkmal finden sich immer andere zusammen, so die relative Größe und der massige Stiel des Sporangiums; letzterer ist in einigen Fällen sogar tief in das Gewebe des Sporophylls eingesenkt. Das Sporenerträgnis jedes Sporangiums ist relativ groß, der Annulus, wenn vorhanden, oft von kompliziertem Bau, die Dehiszenz erfolgt durch einen Längsriß. Diese Farne haben nicht immer Sori; wo solche bestimmt vorhanden sind, fehlt gewöhnlich ein spezialisiertes Schutzorgan.

Alle diese und noch andere Charaktere deuten auf einen primitiven Zustand hin. Dichotome Verzweigung der Achse, des Blattes und selbst der Wurzel ist häufig, wenn auch nicht konstant. Die Nervatur der Blätter ist offen, netzartige Vereinigungen sind selten. Als dermale Anhangsgebilde treten gewöhnlich Haare, nicht Schuppen, auf. Der steläre Bau der Achse ist entweder protostel oder aber von einem davon abgeleiteten, einfachen Typus (ausgenommen die Marattiaecae), und die Blattspur ist gewöhnlich ungeteilt. Am Scheitel der Achse, des Blattes und der Wurzel finden wir häufig eine Anzahl von Initialen, und die dadurch angezeigte massige Organisation ist sogar in den Kanten der jungen Blätter zu erkennen. Das Prothallium ist massig, die Sexualorgane sind tief eingesenkt, die Antheridien enthalten sehr zahlreiche Spermatocyten. Die Embryologie kennt ebenfalls ziemlich massige Strukturen, ein Suspensor ist jedoch nur in wenig Fällen vorhanden. Alle diese Charaktere zusammen mit denen des Sorus, zeigen an, daß die Simplices weit abstehen von den vorherrschenden Typen der heutigen Farne. Sie umfassen

Digitized by Google

Familien, die meist nur durch wenige lebende Genera und Species vertreten sind, manche von ihnen gehen zurück bis zu den Fossilien des Paläozoikums und wieder andere sind überhaupt nur im fossilen Zustand bekannt. Aus alledem ergibt sich, daß die Simplices die primitivsten Vertreter der Filicales darstellen. Wir teilen sie ein in folgende Familien:

1. Coenopterideae.
2. Ophioglossaceae.
3. Marattiaceae.
4. Osmundaceae.
5. Schizaeaceae.
6. Gleicheniaceae.
7. Matonineae.

Darin sind alle eusporangiaten Farne eingeschlossen und außerden noch einige Leptosporangiaten. Es steht bis jetzt noch nicht genügend Beweismaterial zur Verfügung, um zeigen zu können, daß irgend zwei der genannten Familien von gemeinsamer Abstammung sind, wie wahrscheinlich das auch sein mag. So kann man wohl annehmen, daß eine Verwandtschaft besteht zwischen den Coenopterideae und den Ophioglossaceae, oder zwischen den Gleicheniaceae und den Matonineae. Aber bei dem jetzigen Zustand der Ungewißheit wird es das beste sein, sie getrennt zu betrachten in der angegebenen Reihenfolge. Die Familien sind jedoch so angeordnet, daß diejenigen, welche die ursprünglichsten Charaktere zeigen, vorangestellt sind; auf die folgen dann jene, welche den gewöhnlichen leptosporangiaten Farnen näher stehen.

1. Coenopterideae. Der Name ist von Seward (Fossil Plants, Vol. II, S. 433) eingeführt worden, um die alten Familien der Botryopterideae und Zygopterideae zu bezeichnen, welche beide nur im fossilen Zustande bekannt sind. Wir finden sie in den Schichten des Devons bis zum Perm, und seitdem sind sie ausgestorben. Die Erkennung ihrer Farnnatur beruht teils auf ihrer Anatomie, teils auf der schneckenförmig aufgerollten Knospenlage und auf der Tatsache, daß am distalen Teil wiederholt gefiederter Blätter zahlreiche Sporangien stehen. Endlich hat Scott gezeigt, daß bei Stauropteris oldhamia Scott die Sporen im Sporangium keimen können, so wie wir das sehen bei Todea und anderen Farnen. Die Coenopterideae unterschieden sich jedoch von den gewöhnlichen Farnen in mehreren Punkten.

Der Sproß dieser Pflanzen, wenigstens des größten Teils derselben, war radial gebaut. Die Achse war dünn im Verhältnis zu den großen Blättern; sie wurde getragen von stützenförmigen Wurzeln. In manchen Fällen waren viele Axillarknospen zu finden, so wie bei den modernen Hymenophyllaceae. Die Achse war protostel (Fig. 5), bei den Zygopterideae war jedoch der zentrale Teil des Xylems differenziert in ein Gemisch von Tracheiden und Parenchym. Der Umriß der Stele war manchmal sternförmig (Asterochlaena). In den einfacheren Fällen scheinen die Blätter vom gewöhnlichen Typus der Farne gewesen zu sein; bei den großen Zygopteriden jedoch sind sie von eigenartiger Beschaffenheit, sowohl der äußeren Form als auch des anatomischen Baues. Letzterer zeigt sich darin, daß das Bündel des Blattstiels die Form eines „Doppel-Ankers" hat, was damit zusammenhängt, daß an der Rachis 4 Reihen von Fiederblättchen sitzen. An der Blattbasis und an der Achse finden wir zudem Schuppen oder „Aphlebien"; Scott hält sie für modifizierte, basale Fiedern (Ann. of Bot. 1912, S. 50).

Die Fruktifikation ist bei einer Anzahl dieser Farne bekannt. In einigen Fällen finden wir besondere fertile Blätter. Die Sporangien waren relativ groß, birnförmig, und standen quastenförmig zusammen am Ende oder am Rande der Fiederchen. Manchmal waren sie auch vereinigt zu kreisförmig abgegrenzten Gruppen, den Sori. Ihre Wand bestand in manchen Fällen aus mehr als einer Zellage; der Annulus stellte sich als ein mehrreihiges Band von Zellen dar (Fig. 30). Sie enthielten Sporen, deren Zahl auf viele Hundert in jedem Sporangium geschätzt wird.

Der einfache protostele Bau der Achse, die haarähnlichen epidermalen Anhangsgebilde, die großen eusporangiaten Sporangien mit mehrreihigem Annulus und das große Sporenerträgnis jedes Sporangiums, weisen klar und deutlich auf einen primitiven Zustand hin, wenn auch die kompliziert gebauten Blätter einen ungewöhnlichen Zustand der Spezialisation aufweisen. Es besteht kein Zweifel darüber, daß die Coenopterideae primitive Farntypen waren. Jedoch es ist schwierig, sie enger anzuschließen an irgendwelche lebenden Formen. Renault, der diese Familie zuerst bildete, vermutete eine Verwandtschaft mit den Hymenophyllaceae, Osmundaceae und Ophioglossaceae. Diese Ansicht ist wahrscheinlich richtig, obgleich keine dieser Verwandtschaften als sehr nahe angesehen werden kann. Es ist möglich, daß die Coenopterideae, so wie wir sie durch die Fossilien kennen, nicht die Vorfahren irgendeiner der genannten Familien waren, doch mögen sie wohl mit den Formen, von denen diese abstammen, verwandt gewesen sein.

2. Ophioglossaceae. Die Verwandtschaft dieser Familie ist noch nicht zweifellos

festgestellt. Wir besitzen keine zuverlässige fossile Geschichte derselben, und die Pflanzen, aus denen sie zusammengesetzt ist, haben solch besondere Merkmale, daß Gegenstand langer Debatte die Frage war, ob sie verwandt seien mit den Lycopodiales, den Sphenophyllales oder mit den Filicales. Ueber die Anatomie der Coenopterideae ist jedoch in letzter Zeit manches bekannt geworden, was auf eine Verwandtschaft der Familie mit diesen frühen Farnen hinweist.

Die Ophioglossaceae umfassen 3 Genera: Ophioglossum mit 43 Arten, Botrychium mit 34 Arten und Helminthostachys mit nur einer Art. Die Vertreter dieser kosmopolitischen Familie sind perennierend, meist mit einem unterirdischen Stamm; einige leben epiphytisch. Mit Ausnahme von Helminthostachys haben sie alle einen kurzen aufrechten Stamm mit einer Endknospe. Jedes Jahr reift nur ein Blatt,

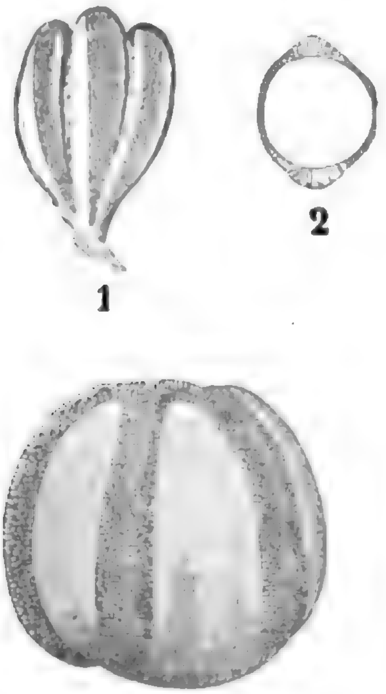


Fig. 30. 1, 2 Zygopteris pinnata. 1 eine Gruppe von Sporangien mit ihrem breiten Annulus. 2 ein Schnitt durch ein Sporangium. Nach Renault. Die untere Figur zeigt einen Sorus von Corynepteris corallioides. (Nach Zeiller.

manchmal 2 oder mehr. Bei Helminthostachys und augenscheinlich auch bei anderen Formen finden sich schlafende Axillarknospen, ähnlich wie bei gewissen Coenopteriden, die gelegentlich die beschädigte apikale Knospe ersetzen können. In der Regel kommt in jeder Vegetationsperiode nur ein Blatt zum Vorschein. An seiner Basis ist es durch eine Scheide geschützt. Das Blatt ist langgestielt; an der Lamina sind zwei Regionen zu unterscheiden. Der sterile Teil, der bei Ophioglossum ganz ist, bei Botrychium dagegen ein- bis dreifach gefiedert und bei Helminthostachys handförmig. An der adaxialen Seite erhebt sich von der Basis des sterilen Blatteils die fertile Aehre, die bei Ophioglossum einfach, bei Botrychium jedoch verzweigt ist wie das sterile Blatt. Diese eigentümliche Anordnung ist für die Familie charakteristisch (Fig. 31). Bei Ophioglossum stehen die Sporangien in zwei Reihen tief eingesenkt an den Flanken der Aehre. An ihrer Stelle finden wir bei Helminthostachys dicht aneinander gereihte Sporangiophoren, von denen jedes mehrere Sporangien trägt. Bei Botrychium haben wir randständige Reihen von Sporangien, aber die Sporangien entspringen getrennt voneinander. Die Sporangien sind massiv, das Sporenerträgnis ist groß. Die Sporen sehen alle gleich aus.

Die Morphologie des Blattes kann auf zweierlei Weise interpretiert werden. Nach der alten Ansicht von Roeper soll die Aehre das Ergebnis einer Verschmelzung von einem Paar basaler Fiedern sein; er vergleicht das mit Aneimia, wo die basalen Fiedern aufgerichtet und fertil sind und in Juxtaposition stehen. Nach Mettenius dagegen ist die Aehre ein Organ, vergleichbar mit dem adaxialen Sporangium der Lycopodinen oder mit dem Sporangiophor der Psilotaceae. Ueber diese Kontroverse kann hier nicht diskutiert werden: wir müssen uns damit begnügen, zu sagen, daß durch die anatomischen Untersuchungen die Ansicht Roepers bestätigt zu werden scheint.

Die Anatomie des Stammes zeigt an der Basis einen primitiven Zustand. Weiter nach oben finden wir einen Uebergang zu solenostelen und dictyostelen Strukturen, jedoch ohne inneres Phloem. Botrychium hat sekundäres Dickenwachstum, Spuren davon finden sich bei Helminthostachys. Das kommt den Verhältnissen bei dem Coenopteridenfossil Botrychioxylon gleich. Die anatomischen Charaktere des Blattes deuten darauf hin, daß Ophioglossum relativ fortgeschritten ist im Vergleich zu Botrychium und Helminthostachys. Im ganzen genommen weisen die anatomischen Merkmale auf eine Verbindung mit den Filicales hin.

Aus der keimenden Spore entsteht ein Prothallium, das unterirdisch lebt und sich saprophytisch ernährt; die Sexualorgane sind tief eingesenkt, die Zahl der Sperma-

Digitized by Google

tocyten in jedem Antheridium ist sehr groß (Fig. 32). Die Embryologie zeigt im allgemeinen die gleichen Verhältnisse wie bei einem eusporangiaten Farn. Bei Botrychium obliquum und bei Helminthostachys ist ein

A B

Fig. 31. A Sporophyt von Botrychium Lunaria, mit aufrechtem Stengel und reifem fertilem Blatt. Etwa ½ natürliche Größe. Nach Strasburger. B Sporophyt von Ophioglossum vulgatum, mit reifem fertilem Blatt, darunter der aufrechte Stengel mit der Knospe für das folgende Jahr. ½ natürlicher Größe. Nach Strasburger.

Suspensor beobachtet worden, den wir unter den Filicales bei Danaea wiederfinden, dann aber auch bei den Lycopodiales. Die Summe der Charaktere dieser Familie ergibt eines der schwierigsten Probleme phyletischer Beziehungen. Vieles deutet auf eine Verwandtschaft mit den Lycopodiales und Sphenophyllales hin; jedoch die anatomischen Merkmale werden immer mehr eine Stütze der Annahme einer Verwandtschaft mit den frühesten Farntypen, und besonders mit den Coenopterideae. Auf jeden Fall bilden die Ophioglossaceae eine besondere Gruppe, und manche halten es für das beste, diese Sonderstellung durch die Aufstellung des Phylums der Ophioglossales zum Ausdruck zu bringen.

3. Marattiaceae. Diese alte Familie wird durch 5 lebende Genera vertreten: Angiopteris mit 62 Arten (wenigstens nach de Vries), Archangiopteris mit 1 Art, Marattia mit 28, Christensenia (= Kaulfussia) mit 1 und Danaea mit 26 Arten. Typen

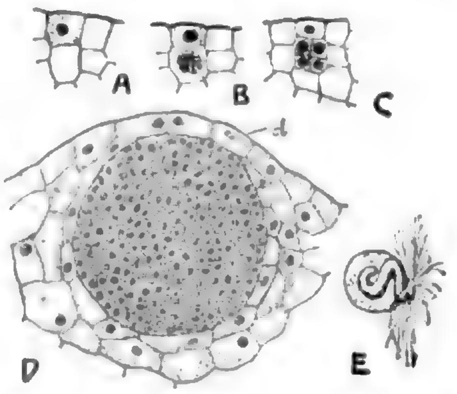


Fig. 32a. Ophioglossum vulgatum. A bis C Stadien der Entwickelung des Antheridiums aus einer superfizialen Zelle. Die obere Zelle in C liefert die Deckzellen, die untere die Spermatocyten. D noch nicht geöffnetes Antheridium, d Deckzellen. E Spermatozoid. Nach Bruchmann.

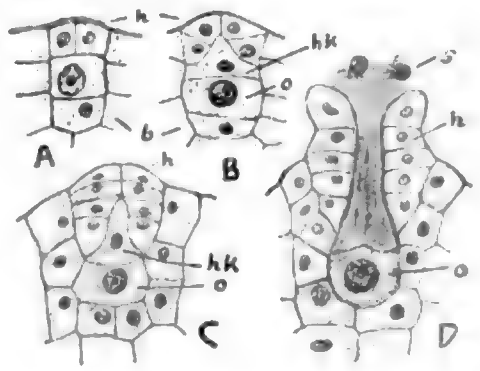


Fig. 32b. Ophioglossum vulgatum. A bis C Entwickelung des Archegoniums. D reifes, geöffnetes Archegonium mit 2 Spermatozoiden (s) an der Oeffnung. h Halszellen, hk Halskanalzelle, o Eizelle, b Basalzelle. Nach Bruchmann.

mit den anatomischen und den Merkmalen des Sorus der Familie finden wir schon zur paläozoischen Zeit.

Die kurze, massive Achse dieser Genera ist zuerst aufrecht, radiär und unverzweigt. Bei den 3 erstgenannten Gattungen bleibt das immer so; bei Kaulfussia und Danaea jedoch wird die Achse schief und dorsiventral, wenn die Pflanze heranwächst. Die Blätter tragen an ihrer Basis Stipulae. Das Blatt selbst ist gewöhnlich lederartig und im Umriß verschieden gestaltet. Bei

Digitized by Google

Danaea simplicifolia ist es oval, dagegen einfach gefiedert bei anderen Danaeaarten und bei Archangiopteris; endlich mehrfach und oft kompliziert gefiedert bei Marattia und Angiopteris (Fig. 33, $_4$). Die Blätter von Kaulfussia sehen aus wie die der Roßkastanie. Die Wurzeln entspringen im Innern des fleischigen Stammes. Die Aderung der Blätter entspricht dem Pecopteridentypus, nur Kaulfussia hat Netznervatur. Die Adern vereinigen sich gegen die Blattbasis hin zu zahlreichen Strängen, die im Blattstiel in konzentrischen Ringen angeordnet erscheinen; diese treten dann in das axiale Gefäßsystem ein, das, besonders bei Marattia und Angiopteris, aus zahlreichen Strängen besteht, die ebenfalls in konzentrischen Ringen verlaufen. Die Wurzeln besitzen eine polyarche Stele.

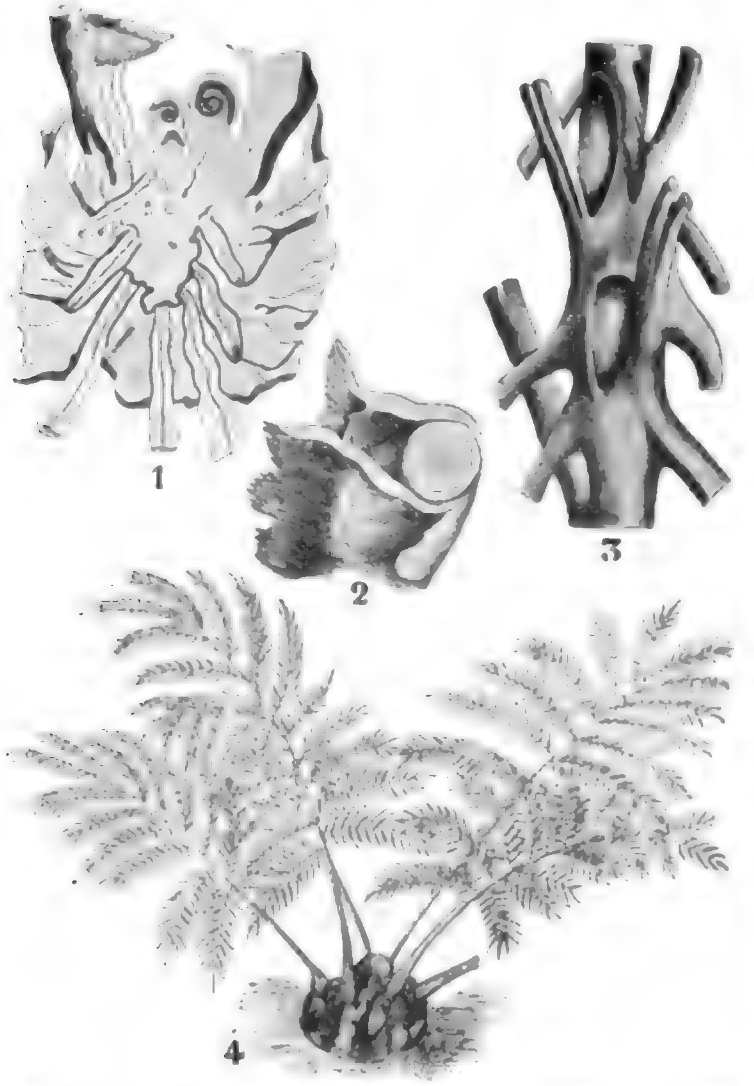


Fig. 33. Angiopteris evecta. 1 Vertikalschnitt durch den Stamm einer jungen Pflanze. Nach Goebel. 2 Basis eines Blattstiels, mit 2 seitlichen Stipulae. Nach Goebel. 3 Stele einer jungen Pflanze mit Blattlücken. Nach Farmer und Hill. 4 Habitus der Pflanze. Nach Bitter.

Die Sori sitzen an der Blattunterseite; jeder Sorus enthält eine einzige Reihe massiver Sporangien, die um einen zentralen Punkt oder Linie herumstehen (Fig. 34). Die Sporangien sind eusporangiat und enthalten sehr viele Sporen: so bei Kaulfussia etwa 7850, Marattia 2500, Danaea 1750, Angiopteris 1450. Bei Angiopteris und Archangiopteris stehen die einzelnen Sporangien getrennt, bei den anderen Genera sind sie verschmolzen zu großen synangialen Sori. Die Sporangienwand besteht aus mehreren Zelllagen. Ein spezialisierter Annulus ist nicht vorhanden; beim Aufspringen entsteht ein medianer Riß, der bei Danaea und Kaulfussia auf eine scheinbar terminale Oeffnung reduziert sein kann.

Das grüne Prothallium ist groß und fleischig, die Sexualorgane sind tief in sein Gewebe eingesenkt. Die Embryologie ist dadurch eigentümlich, daß die junge Pflanze die Oberfläche des Prothalliums durchbricht und dann zunächst aufrecht wächst. Danaea hat außerdem noch einen Suspensor vergleichbar dem von Helminthostachys und Botrychium obliquum.

Fossilien, die in Stamm und Wurzel eine den lebenden Marattiaceae vergleichbare Struktur zeigen, finden sich in der paläozoischen Periode (z. B. Psaronius); das Karbon liefert Fossilien mit Sori, die genau denen von Angiopteris (z. B. Scolecopteris) oder von Kaulfussia (z. B. Ptychocarpus) gleichen. Andere Fossilien, die man früher zu den Marattiaceae stellte, haben sich als samentragende Pflanzen erwiesen. Es ist wohl möglich, daß mit der Zeit noch andere heute zu den Marattiaceae gezählten fossilen Formen von diesen abgetrennt werden müssen. Inzwischen ist es das beste, alle scheinbar zu den Marattiaceae gehörenden Fossilien auch wirklich als echte Farne anzusehen, solange ihre Pteridospermennatur nicht völlig klar gestellt ist. Es kann wohl kaum bezweifelt werden, daß die Marattiaceae nach oben hin in Verbindung stehen mit gewissen Pteridospermen. Ihre Beziehung zu anderen echten Farnen ist problematisch. In der Tat ist ihre Stellung ziemlich isoliert.

4. Osmundaceae. Die Osmundaceae werden dargestellt durch die lebenden

Digitized by Google

Gattungen Osmunda und Todea mit gegen 20 Arten. Sie sind weit verbreitet und ihre fossilen Vertreter reichen zurück bis zum Perm. Die bekannteste Form der Familie ist der „Königsfarn", Osmunda regalis. Alle Osmundaceae haben einen massiven, aufrechten, radiär gebauten Stamm, der sich dichotom verzweigen kann; claytoniana (Fig. 35, 5, 6). Nach unten hin können sie seitlich miteinander verschmelzen, so daß sie ein zylindrisches Netzwerk bilden, dessen Maschen sehr lang und eng sind. Die ganze Stele ist umgeben von einem Phloemband und einer Endodermis (Fig. 35, 9). Jeffrey und Faull halten diese Struktur für eine reduzierte

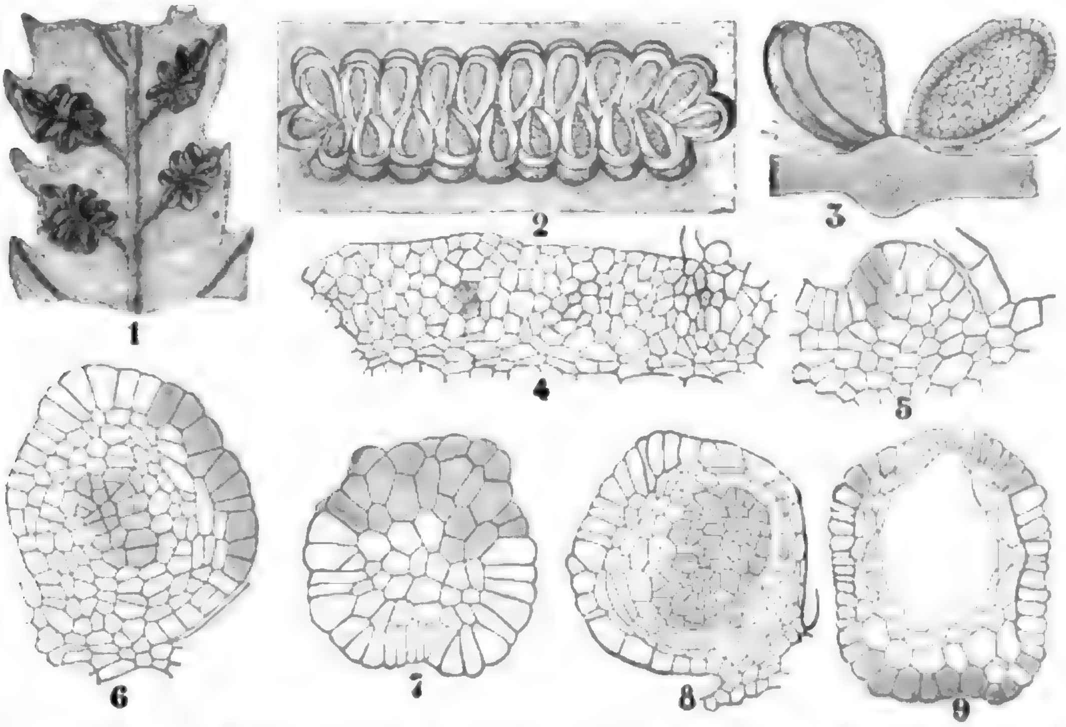


Fig. 34. 1 Stück der Blattunterseite von Angiopteris caudata, mit Sori. Nach Goebel. 2 Sorus von Angiopteris crassipes Wall. Nach Bitter. 3 Zwei Sporangien derselben, das linke in Seitenansicht, das rechte in Längsschnitt. Nach Bitter. 4 bis 9 Sporangienentwickelung von Angiopteris evecta. Nach Bower. 4 Teil eines jungen Sorus, von oben gesehen. 5 Längsschnitt eines jungen Sporangiums. 6 Längsschnitt eines älteren Sporangiums. 7 Spitze eines fast reifen Sporangiums, von oben gesehen. 8 Längsschnitt eines Sporangiums im Stadium der Sporenmutterzellen, das Tapetum mit × bezeichnet. 9 Querschnitt eines fast reifen Sporangiums.

die Blätter stehen dicht gedrängt an demselben, die Blattbasen bleiben zurück. Wir finden hier Blätter von lederartiger Beschaffenheit (Todea barbara) bis zu solchen, die dünn und häutig, fast durchsichtig sind (Todea superba); die Nervatur ist von primitivem Typus, offen und gegabelt. Die jungen Blätter sind bedeckt mit einer dichten Schicht von Schleimhaaren. Schuppen fehlen.

Die Anatomie des massiven Stammes der lebenden Typen war der Gegenstand lebhafter Kontroversen. Die Blattspur besteht aus einem einzigen Strang, der beim Eintritt in die Achse die Gestalt eines U annimmt, wobei das Protoxylem an der Wölbung des U liegt. Sie bildet dann zusammen mit den anderen gerade so gebauten Blattspuren einen Ring, der ein zentrales Mark umgibt. Ihre Zahl ist verschieden, von 8 oder weniger bei Todea barbara bis zu 40 bei Osmunda amphiphloisch siphonostele. Die Untersuchung verwandter Fossilien durch Kidston und Gwynne-Vaughan hat aber unzweifelhaft ergeben, daß wir es hier mit einer Aufwärtsentwickelung zu tun haben, die ausgegangen ist von einem markhaltigen (medullated) protostelen Typus. Dadurch wird auch ein bedeutsames Licht geworfen auf die Art und Weise, auf welche Erweiterungen der Stele entstehen können.

Die ersten Teilungen der Achse, des Blattes (vgl. Fig. 23B), des Blattrandes und der Wurzel von Osmunda gehen alle nach einem komplizierteren Schema vor sich als bei den leptosporangiaten Farnen und weisen auf die Eusporangiaten hin. Dasselbe gilt für die Sporangien; bei Osmunda stehen diese an den Blatträndern, ohne zu Sori vereinigt zu sein; bei Todea sind die Sori nur undeutlich und stehen an der Blattunterseite. Ein Indusium fehlt. Die Spor-

Digitized by Google

angien sind relativ groß und haben kurze, dicke Stiele. Beim Aufspringen entsteht sin vertikaler Riß, der durch eine distale, schiefe Gruppe mechanischer Zellen verursacht wird, die man als Annulus anerkennen kann (Fig. 35, 1 bis 4). Die Art und Weise der Teilung, durch die sie erzeugt werden, schwankt, doch erinnert sie an die eusporangiaten Farne (Fig. 21e, f). Jedes Sporangium bildet viele Sporen, etwa zwischen 512 und 128.

Das Prothallium ist verhältnismäßig massiv; jedoch die Sexualorgane und die Embryologie stimmen im wesentlichen mit dem Typus der Leptosporangiaten überein. Nimmt man alle Merkmale zusammen, die äußere Form, Dichotomie der Achse, die Haare, die Anatomie, das Sporangium und die Sporenzahl, so geht klar hervor, daß die Osmundaceae eine relativ primitive Gruppe sind (diese Vermutung wird durch das Auftreten der Gruppe in relativ alten Schichten gestützt). Es bleibt jedoch zweifelhaft, ob sie direkt zu irgendeiner Gruppe lebender Filicales hingeführt haben.

5. Schizaeaceae. Diese Familie umschließt die Genera: Lygodium, Schizaea, Aneimia und Mohria, mit über 100 Species. Sie sind weit verbreitet, jedoch meistens in den Tropen. Fossilien wie Senftenbergia, Klukia und Kidstonia, die ganz die Merkmale der Familie tragen, zeigen uns, daß der Typus der Schizaeaceae schon früh vertreten war. Der Sproß zeigt eine ausgesprochene Neigung zur Dorsiventralität, wenn er auch bei einigen Aneimiaarten radiär gebaut ist. Lygodium hat eine kriechende gegabelte Achse. Die Blätter sind sehr verschieden. Bei Schizaea sind sie dichotom; bei Lygodium im Grunde dichotom verzweigt, jedoch tritt eine Komplikation durch apikales Wachstum ein, zudem ist der Habitus kletternd und die Blätter erreichen oft eine Länge von 100 Fuß. Bei Aneimia sind die 2 basalen Fiedern allein fertil; sie nehmen eine aufgerichtete Stellung an, wodurch Roeper veranlaßt wurde, hier den morphologischen Ursprung der fertilen Aehre der Ophioglossaceae zu suchen.

Die Anatomie der Schizaeaceae ist ebenso verschiedenartig wie ihr äußerer Habitus: wir finden jedoch immer das primitive Merkmal einer ungeteilten Blattspur. Am einfachsten gebaut ist die Achse von Lygodium, sie ist protostel. Das andere Extrem bilden die aufrechten Aneimiaarten, mit einer Dictyostele und sich überdeckenden Blattlücken; die kriechenden Typen zeigen solenostele Struktur. Die meisten Schizaeaceae tragen Haare, nur das Genus Mohria, das auch in anderen Merkmalen einen fortgeschritteneren Typus darstellt, hat Schuppen.

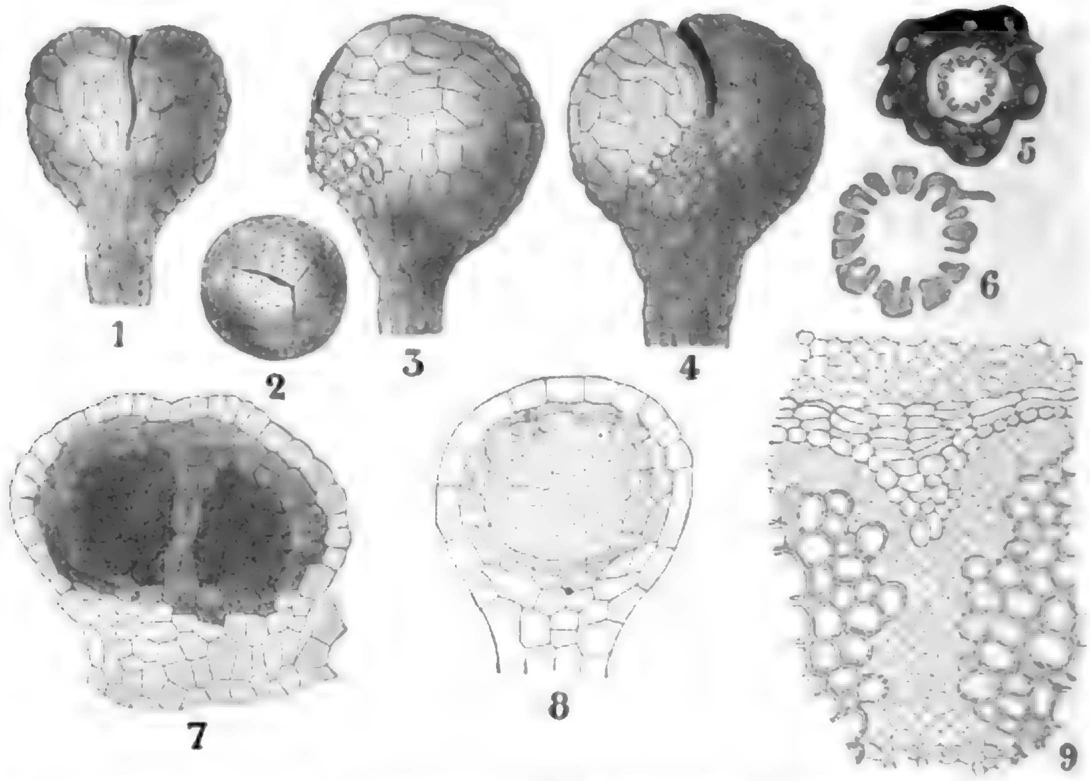


Fig. 35. Osmunda regalis. 1 Ventralansicht, 3 Seitenansicht 4 Dorsalansicht des Sporangiums. Nach Luerßen. 2 Spore. Nach Milde. 5 Querschnitt durch einen kräftigen Stamm. 6 Querschnitt durch den Holzteil desselben. Beide nach de Bary. 8 junges Sporangium. Nach Goebel. 7 ein Doppelsporangium. Nach Bower. 9 Querschnitt durch den vor einem Markstrahl gelegenen Teil einer Stele. Nach Zenetti.

Digitized by Google

Die Sporangien stehen einzeln („monangiale Sori“ von Prantl), und sind ziemlich groß. Sie entstehen immer aus Randzellen, können aber durch nachfolgendes intramarginales Wachstum später superfizial erscheinen; sie sind geschützt durch „indusiale“ Läppchen. Das Aufspringen geschieht durch einen vertikalen Riß (Fig. 36), der durch eine distale Gruppe mechanischer Zellen bewirkt wird. Die Zahl der Sporen schwankt von 256 bei Lygodium bis zu 128 bei den anderen Genera. Der Stiel der Sporangien ist relativ dick, die Teilung des jungen Sporangiums tief (Fig. 21 D). Die Prothallien sehen in einigen Fällen aus wie die anderer Leptosporangiaten, in anderen sind sie fadenförmig fast wie bei den Hymenophyllaceae.

6. Gleicheniaceae. Dazu gehören etwa 80 lebende Arten der Genera Stromatopteris und Gleichenia; einige Systematiker anerkennen nur das Genus Gleichenia. Es sind im wesentlichen tropische Formen, die sich aber weit südlich bis Neu-Seeland erstrecken. Im Mesozoikum waren Farne vom Typus der Gleicheniaceen sicher vorhanden; Fossilien wie Oligocarpia und Diplotmema lassen das Vorkommen der Gleicheniaceen im Paläozoikum vermuten.

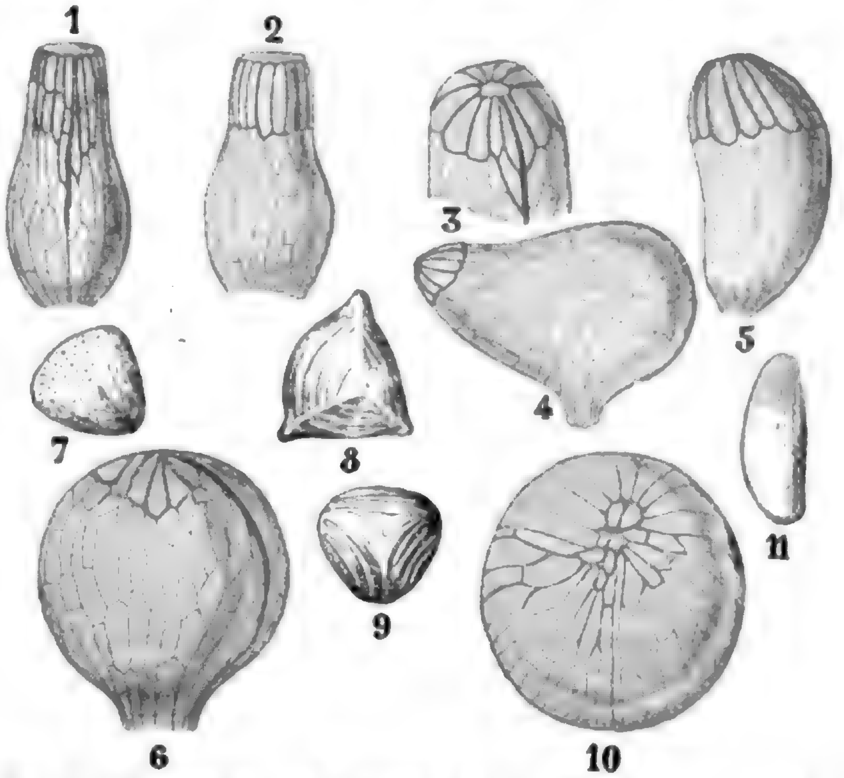


Fig. 36. Sporangien und Sporen der Schizaeaceae. 1 und 2 Aneimia Phyllitidis Sw. 1 von innen. 2 von außen. 3 und 5 Schizaea pennula Sw. 5 von der Seite. 3 oberer Teil schräg von außen oben. 4 Lygodium japonicum Sw., von der Seite. 6 und 10 Mohria caffrorum (L.) Desv. 10 von oben. 6 von der Seite. 7, 8, 9, 11 Sporen der Schizaeaceae. 11 Schizaea pennula Sw. 7 Lygodium japonicum Sw. 9 Mohria caffrorum (L.) Des. 8 Aneimia fulva Sw. Nach Prantl.

Gleichenia hat eine ausgedehnte, kriechende Achse, die dichotom verzweigt ist. Sie trägt Blätter, die einfach gefiedert sein können (G. platyzoma), die aber gewöhnlich höhere Grade der Verzweigung zeigen. Das Ganze erhält oft einen gespreizten Habitus. Das apikale Wachstum des Blattes setzt in bestimmten Intervallen aus, so daß der Scheitel als eine schlafende Knospe zwischen dem zuletzt gebildeten Paar Fiedern erscheint und so der Eindruck der Dichotomie erweckt wird. In Wirklichkeit haben wir es immer mit einer monopodialen Fiederung zu tun. Die so zusammengesetzten Blätter bilden ausgedehnte Dickichte, besonders in den tropischen Savannen.

Anatomisch zeigen die Gleicheniaceae schöne Uebereinstimmung. Die Blattspur ist immer primitiv, ungeteilt meristel, ziemlich kontrahiert entsprechend dem gespreizten Habitus. Der hufeisenförmig gebogene Strang kann sogar mit seinen freien Enden zusammenstoßen, so daß eine zylindrische Pseudostele entsteht (Fig. 37, 8). Das Rhizom ist bei den meisten Arten protostel (Fig. 37, 1 bis 4), nur bei G. pectinata, eine Form, die auch in anderer Hinsicht fortentwickelt ist, ist es solenostel (Fig. 37, 7).

Die Sori der Gleicheniaceae sind superfizial und nackt; sie stehen in einer Reihe auf jeder Seite der Mittelrippe. Sie enthalten wenige, massive Sporangien mit kurzen Stielen; ein schiefer Annulus ist vorhanden, das Aufreißen geschieht in Flächen, die vom Mittelpunkt des Sorus ausstrahlen (Fig. 38, 5). Bei den primitiveren Formen des Genus stehen im Zentrum des Sorus keine Sporangien, so wie bei den Marattiaceae. Aber 2 Species weichen davon ab, nämlich G. linearis und G. pectinata. Da beide anatomisch fortgeschrittene Typen darstellen, so kann die Aenderung der Anordnung im Sorus wohl auch für einen Fortschritt gehalten werden (Fig. 38, 10 bis 17). Mit der größeren Zahl der Spor-

Digitized by Google

angien geht zusammen eine Reduktion ihrer Größe und der Zahl der erzeugten Sporen. Bei G. flabellata liegt die Sporenzahl zwischen den typischen Zahlen 1024

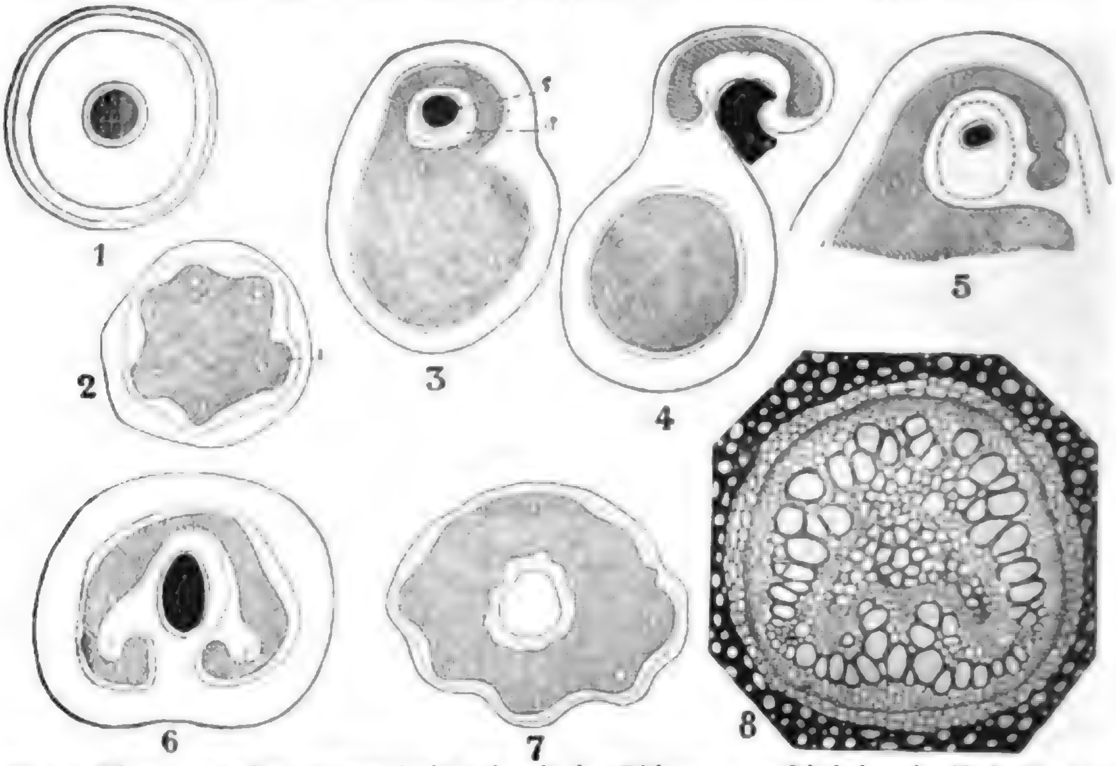


Fig. 37. 1 Diagramm eines Querschnitts durch das Rhizom von Gleichenia flabellata. Nach Boodle. 2 Querschnitt der Stele des Internodiums, das Phloem mittels einer gestrichelten Linie angedeutet, das Metaxylem schraffiert, das Protoxylem durch kleine Kreise angedeutet. 3 und 4 Querschnitt durch die Stele eines Knotens von Gleichenia flabellata. Nach Tansley 5 und 6 Gleichenia circinata. 5 Verbindung des Blattbündels mit der Stele. 6 Querschnitt des Blattbündels. 7 Querschnitt der Stele von Gleichenia pectinata. Nach Boodle. 8 Querschnitt der Basis des Petiolus von Gleichenia dicarpa, die pseudosteläre Struktur zeigend. Nach Gwynne-Vaughan.

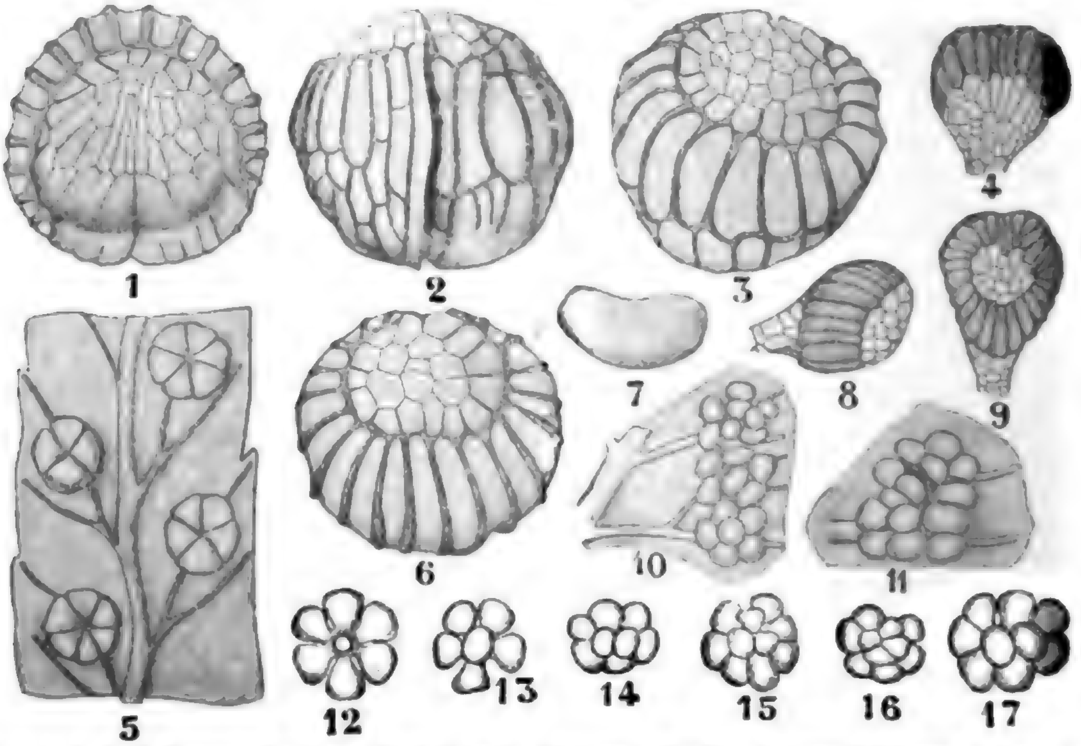


Fig. 38. 1, 2, 3, 6 Sporangien von Gleichenia dicarpa R. Br., in verschiedener Lage. 1, 2 die Dehiszenz zeigend. Nach Diels. 5 Teil eines fertilen Segmentes von Gleichenia flabellata R. Br., mit Aderung und Sori. 7 Spore von Gleichenia pedalis Kaulf. 4, 8, 9 Sporangien von Gleichenia dichotoma, von verschiedenen Seiten gesehen. 10, 11 Zerklüftung der Sori von Gleichenia dichotoma. 12 bis 17 radiär gebaute Sori, mit einem oder mehreren Sporangien im Zentrum des Sorus.

Digitized by Google

und 512. Bei G. pectinata und linearis schwankt sie zwischen 512 und 256, und bei den kleineren Sporangien kann sie noch niedriger sein. In der Tat werden diese Species durch ihre Anatomie und die Merkmale der Sori als die fortgeschrittensten Formen der Familie gekennzeichnet. Das ist von Bedeutung in bezug auf die hiervon abgeleiteten Reihen der Cyatheoideae.

Das Prothallium und die Embryologie von Gleichenia stimmen mit dem bei den Leptosporangiaten üblichen Typus überein, jedoch zeigen die Sexualorgane und besonders die Antheridien für die Vergleichung wichtige Merkmale. Die Antheridien sind in der Größe verschieden, die Zahl der erzeugten Spermatozoiden übertrifft weit das bei den leptosporangiaten Farnen gewohnte Maß. Das ist wohl ein primitives Merkmal, das besonders interessant ist im Vergleich mit dem relativ großen Sporenerträgnis der Sporangien. So lassen denn die Merkmale der Anatomie, des Sorus und des Sporangiums, wie auch der Antheridien, die Gleicheniaceae als eine primitive Gruppe erkennen, eine Annahme, die noch gestützt wird durch ihr frühes Vorkommen.

7. Matonineae. Zu dieser Familie, im engeren Sinne, gehört nur ein Genus der lebenden Farne, nämlich Matonia. Jedoch ergibt sich aus verwandten Fossilien, daß Formen der Gruppe vorherrschend waren in der Flora des Mesozoikums und sie lassen sich zurückverfolgen bis ins Rät. Dieses hohe Alter stimmt überein mit der großen Analogie, die sie zu den Gleicheniaceae zeigen, mit denen sie wahrscheinlich verwandt sind.

Matonia pectinata wächst am Boden dahin und hat ein kriechendes Rhizom, das mit Haaren bedeckt ist und sich scheinbar dichotom verzweigt. Die vereinzelt stehenden Blätter erreichen eine Höhe von 6 bis 8 Fuß; die Lamina ist fußförmig und hat ihre Entstehung einer dichotomen Verzweigung zu verdanken (Fig. 39, 1). Die einzelnen Blattabschnitte sind gefiedert. Die superfizialen Sori stehen vereinzelt in der Nähe der Mittelrippe. Das reife Rhizom zeigt die komplizierteste solenostele Struktur, die bei Farnen bekannt ist. Der einfachere Bau der jungen Stämme läßt vermuten, wie der komplizierte Endzustand erreicht worden ist. In einem solchen Rhizom findet man 3 konzentrische Gefäßringe, die in ein Grundparenchym eingebettet sind; jeder derselben ist typisch solenostel. Die Blattspur stellt eine ungeteilte, aber stark gekrümmte Platte von Gefäßbündelgewebe dar, die an den Knoten mit dem äußeren und mittleren Ring Verbindungen eingeht; zwischen den Knoten können dazu noch Verbindungen mit dem inneren Ring kommen. Das ganze System kann als eine sehr komplizierte Ableitung vom solenostelen Typus betrachtet werden. Der Sorus ist vom Gleicheniatypus: er enthält 6 bis

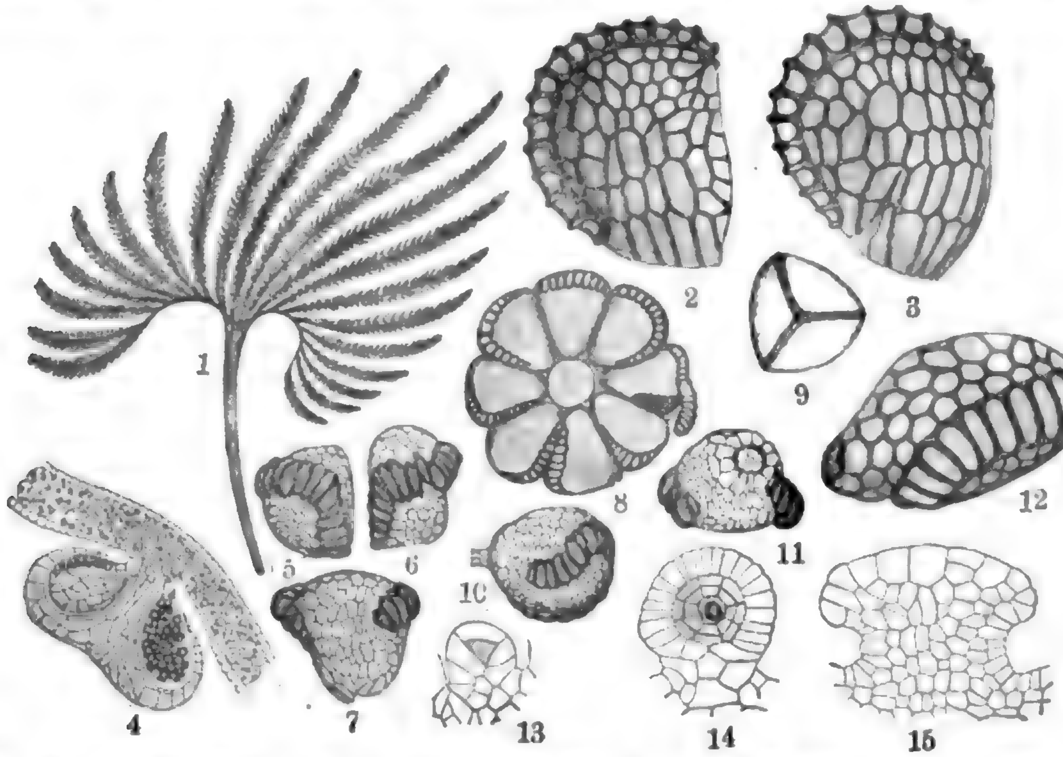


Fig. 39. 1 Blatt von Matonia pectinata. Nach Diels. 2, 3, 12 Sporangien von verschiedenen Seiten. Nach Diels. 9 Spore. Nach Diels. 4 Längsschnitt durch den Sorus. Nach Diels. 5 bis 8, 10, 11, 13 bis 15 Entwickelung der Sporangien. Nach Bower.

Digitized by Google

9 Sporangien und ist bedeckt von einem lederigen, schirmförmigen Indusium, das zuletzt abfällt (Fig. 39, 4). Das ist das einzige Vorkommen eines Indusiums bei den Simplices, unter denen Matonia eine besonders fortgeschrittene Stellung einnimmt. Dieser Schluß ist nicht nur auf die Anatomie gegründet, sondern auch auf die Tatsache, daß die Sporangien, obgleich sie den schiefen Annulus beibehalten haben, doch laterale Dehiszenz zeigen; die Sporenzahl liegt zudem zwischen 48 und 64, wie wir es ähnlich nur bei den höher entwickelten Typen wiederfinden. Aus dem paläontologischen Material ergibt sich, daß Matonia ein alter Typus ist, aber doch nicht zu den frühesten Formen gehört. Die Familie kann als verwandt mit den Gleicheniaceae betrachtet werden, sie zeigt jedoch in mancher Hinsicht letzteren gegenüber Anfänge einer Fortentwickelung, die wir bei gewissen leptosporangiaten Nachkommen vollendet finden.

B. Gradatae und Mixtae.

Es ist oben darauf hingewiesen worden, daß entsprechend der Anordnung und der Reihenfolge des Erscheinens der Sporangien im Sorus, die Farne als Simplices, Gradatae und Mixtae unterschieden werden. Die Gruppen der Simplices sind kurz besprochen worden, und es könnte nun natürlich erscheinen, in derselben Weise fortzufahren, und nacheinander die Gradatae und die Mixtae zu behandeln. Aber dieses Verfahren schließt die Annahme in sich, daß jedes dieser Merkmale notwendig seinen Platz in der Phylogenie der Farne hat. Das ist jedoch nicht der Fall. Jede der verschiedenen Stammesreihen hat sich in bestimmter Richtung entwickelt, unabhängig davon, was in anderen Reihen vor sich ging. So finden wir in einigen Fällen direkte Uebergänge von dem Sorus der Simplices zu dem der Mixtae; in anderen Fällen ging die Entwickelung bis zum gradaten Typus und blieb dabei stehen; oder endlich es erschienen in demselben Phylum nacheinander alle 3 Typen. Daraus ergibt sich klar, daß wenn wir nacheinander die Simplices, Gradatae und Mixtae abhandelten, dadurch Glieder natürlicher Gruppen auseinander gerissen würden. Wir wollen daher die verschiedenen Gruppen von Farnen, deren Formen offenbar zusammengehören und Stammesreihen darstellen, getrennt betrachten, dabei immer die Wichtigkeit des Merkmals der gradaten oder gemischten Sori im Auge behaltend. Diese Reihen mögen ihrer Abstammung nach in mehr oder weniger enger Beziehung stehen zu den verschiedenen Gruppen der bereits beschriebenen Simplices. Jedoch es ist schon oben bemerkt worden, daß es ungewiß ist, ob irgend zwei der Familien der Simplices eine gemeinsame Stammform haben. In gleicher Weise herrscht Ungewißheit über die Beziehungen der abgeleiteten und spezialisierten Formenreihen der leptosporangiaten Farne zu den Simplices. Unter den Leptosporangiaten selbst sind jedoch bereits durch die systematischen Botaniker bestimmte Reihen erkannt worden. Diese sollen nun kurz beschrieben, ihre möglichen phyletischen Verwandtschaften angegeben werden. Dabei muß immer bedacht werden, daß infolge unserer unvollkommenen Kenntnisse über Einzelheiten diese Gruppierung nur versuchsweise geschehen und eine bessernde Aenderung jederzeit möglich ist.

Wir haben gesehen, daß die Simplices Unterschiede zeigen in der Stellung der Sporangien und Sori in bezug auf den Rand des Blattes, das sie trägt. Bei den Coenopterideae und den Osmundaceae ist die Lage unbestimmt und nicht gleichförmig, sie kann superfizial (Todea, Corynepteris?) oder marginal (Osmunda, Botryopteris) sein. Sie können für primitive Typen gehalten werden, bei denen die Lage der Sori noch nicht fixiert ist, wie bei den meisten Farnen. Bei den Marattiaceae, Gleicheniaceae und Matonineae aber sind die Sori immer superfizial, bei den Schizaeaceae und Ophioglossaceae immer marginal. Diesen Unterschied finden wir auch bei den höher entwickelten Formenreihen wieder. So werden wir sehen, daß die Hymenophyllaceae und die Formen der Dicksonia-Davallia-Reihe immer marginale Sori haben, in dem Sinne, daß die ersten Sporangien wirklich aus Randzellen hervorgehen, während die übrigen Formenreihen mehr oder weniger konstant superfiziale Sori tragen, wo also die ersten Sporangien intramarginal entstehen.

Es ist eine Erfahrungstatsache, daß innerhalb der verschiedenen Stammesreihen der Farne die Stellung der Sori — entweder marginal oder superfizial — in der Regel streng beibehalten wird. Darauf ist in Beschreibungen der Farne im allgemeinen wohl hingewiesen worden, jedoch ist der systematische Wert dieser Tatsache nirgends genügend gewürdigt. Vielleicht deswegen, weil bei manchen Formen mit marginalen Sori letztere die Tendenz zeigen, sich auf die Unterseite hin zu verschieben. Das finden wir besonders bei einigen davallioiden Farnen, und das mag den offensichtlichen Wert dieses Merkmals für die phyletische Vergleichung beeinträchtigt haben. Weiterhin ist zu bemerken, daß in den verschiedenen Phyla, die jetzt betrachtet

Digitized by Google

werden sollen, die indusialen Schutzgebilde des Sorus nicht gleichförmig sind. Es wird gezeigt werden, daß die Beschaffenheit und die Art der Entstehung des Indusiums von einem Phylum zum anderen sich ändert, wenn auch im einzelnen Phylum darin Gleichförmigkeit herrscht. Nach diesen einleitenden Bemerkungen wollen wir nun dazu übergehen, die Hauptreihen der leptosporangiaten Farne zu besprechen, wobei immer soweit als möglich auf die Formen der Simplices hingewiesen werden soll, von denen sie wahrscheinlich abstammen.

8. Die Hymenophyllaceen-Reihe. Die Hymenophyllaceae. Diese Familie umfaßt die großen Genera Hymenophyllum und Trichomanes mit etwa 450 Arten, die sich überall in den Tropen, vereinzelt auch im Norden und Süden finden, ganz besonders aber in Neu-Seeland verbreitet sind. Sie zeigen weitgehende Anpassung an feuchte Standorte; oft erscheinen sie als Epiphyten im Schatten dichter Wälder. Der Sproß ist manchmal aufrecht und radiär gebaut und trägt gebüschelte Blätter, häufiger aber ist er kriechend und hat lange Internodien. Er ist bedeckt mit fadenförmigen Haaren, Ramenta fehlen. Von der Achse entspringen sich ausbreitende Wurzeln; bei einigen wurzellosen Arten von Trichomanes verrichten blattlose Zweige die Funktion der Wurzeln.

Die Hymenophyllaceae werden oft die „Hautfarne“ genannt, wegen der zarten Textur ihrer Blätter, deren Spreiten gewöhnlich aus einer einzigen Schicht durchsichtiger Zellen bestehen. Die Formen der größeren Spezies haben stark verzweigte Blätter mit schmalen Abschnitten. Einige spezialisierte Typen dagegen zeigen breite Blattflächen mit gegabelter Aderung, die wahrscheinlich kondensierte Zweigsysteme darstellen (Fig. 40). Axillarknospen finden sich bei den Hymenophyllaceae allgemein, wenn sie auch häufig rudimentär bleiben und sich nicht entwickeln. Das ist von Interesse im Vergleich mit neuerdings bei den Ophioglossaceae und Zygopterideae entdeckten Verhältnissen.

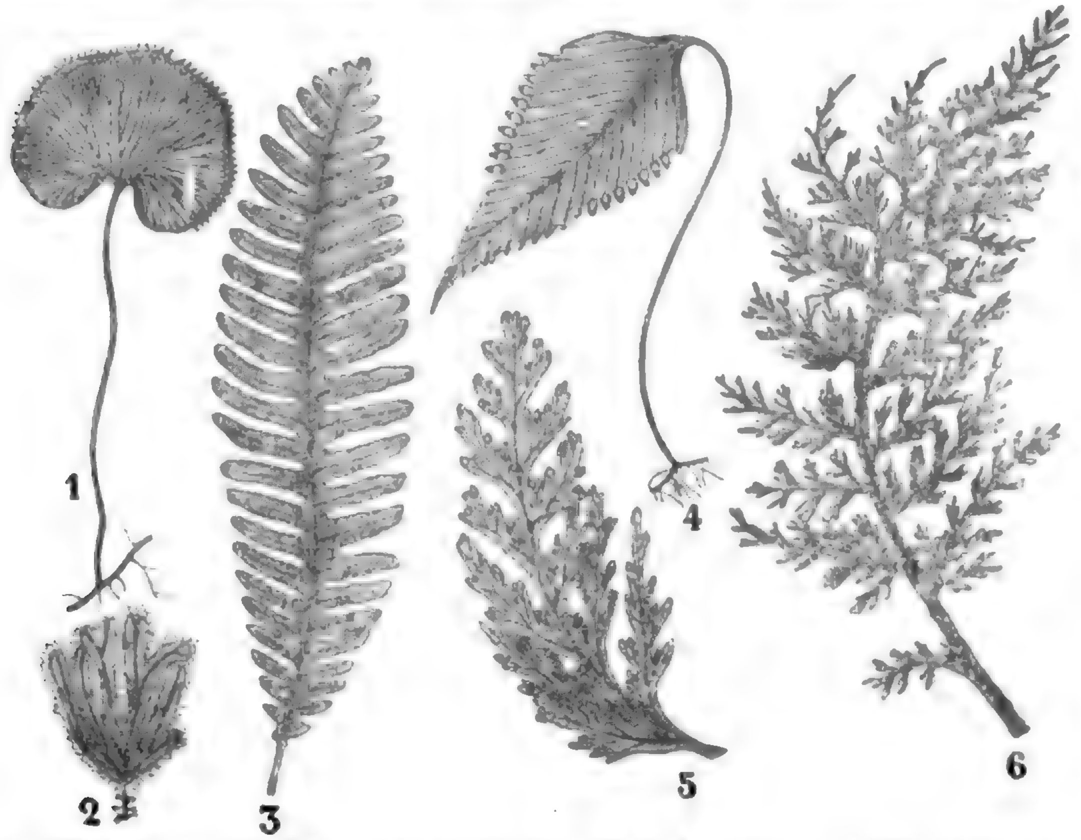


Fig. 40. Blattformen von Hymenophyllaceen. Nach Sadebeck. 1 Trichomanes reniforme Forst. 2 Trichomanes Lyallii, Hooker. 3 Trichomanes spicatum Hedw. 4 Hymenophyllum cruentum, Cav., 5 Hymenophyllum dilatatum Sw. 6 Hymenophyllum australe Willd.

Die Blattspur ist immer ungeteilt; an ihrer Basis gleicht sie der Stele der Achse, weiter nach oben hin wird sie kollateral. Die Achse ist monostel mit peripherem Phloem; im Innern umgibt ein Band von Metaxylem ein zentrales Gewebe von Protoxylem und Parenchym. Das ist im einzelnen verschieden; die Anatomie ist jedoch in vielen Punkten zu vergleichen mit der des alten Genus Zygopteris.

Die Sori sind marginal. Die Sporangien stehen in streng basipetaler Reihenfolge

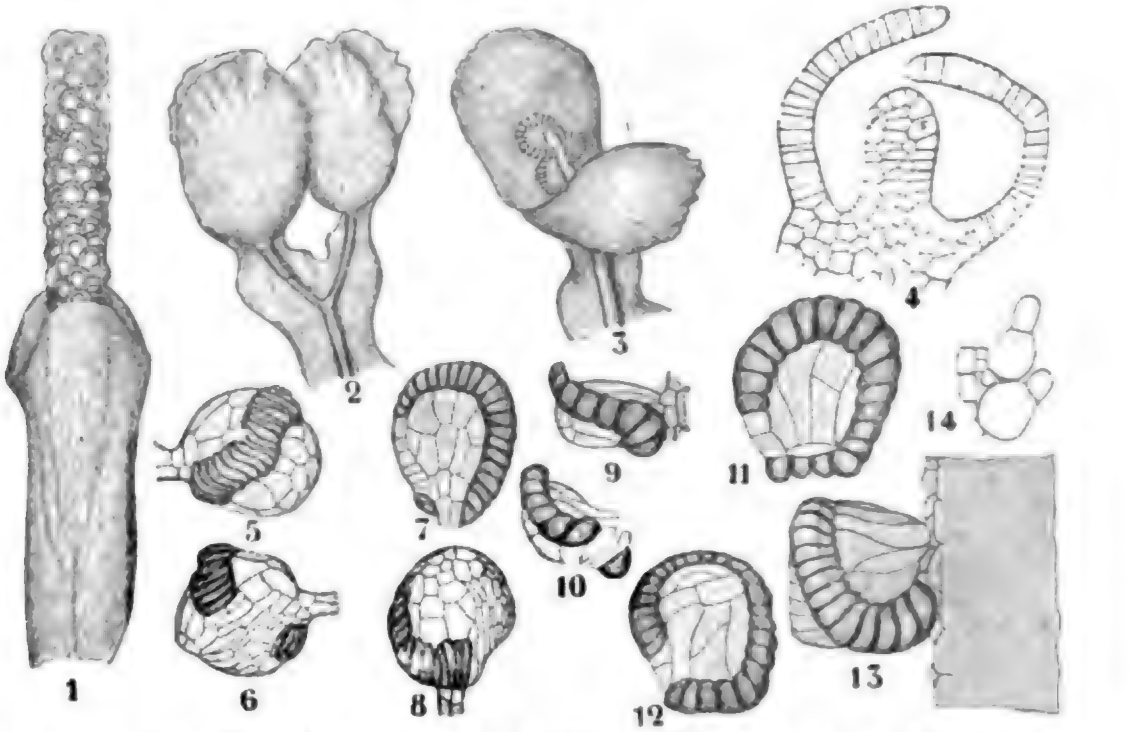


Fig. 41. Sorus und Sporangienformen bei Hymenophyllaceen. 1 Trichomanes tenerum. Nach Goebel. 2 und 3 Hymenophyllum javanicum Spr. Nach v. d. Bosch. 2 zwei Indusien. 3 eine der Indusienklappen zurückgeschlagen. 4 Hymenophyllum Wilsoni Hook. Sorus im Längsschnitt, das Receptakulum zeigend, die ersten Sporangien nahe der Spitze entwickelt, mit Zellteilungen, welche das interkalare Wachstum verursachen. 5 bis 8 Sporangien von Hymenophyllum dilatatum, von verschiedenen Seiten gesehen. 9 bis 12 Sporangien von Trichomanes radicans Sw. 13 und 14 Trichomanes tenerum. Nach Goebel. 13 Sporangium von der Seite. 14 Stück eines Längsschnittes durch die Placenta mit zwei Sporangien, oben und unten der Annulus sichtbar.

an einem Receptakulum, das von der Verlängerung einer Blattader quer durchsetzt wird. Bei gewissen Arten von Trichomanes finden wir die längsten Receptakeln, die bei Farnen bekannt sind (Fig. 41, 1). An der Basis ist das Receptakulum umgeben von einem schüsselförmigen Indusium, das dei Trichomanes ganz ist, bei Hymenophyllum dagegen zweilippig (Fig. 41, 2 und 3). Sori und Sporangien von entsprechendem Typus hat man bis in frühe geologische Formationen zurückverfolgen können: so findet sich im oberen Karbon das noch zweifelhafte Fossil Hymenophyllites. Die Sporangien selbst zeigen große Verschiedenheiten in der Größe und im Sporenertrag; bei Hymenophyllum sind sie am größten. Sie sind kurz gestielt, haben einen schiefen Annulus und springen lateral auf (Fig. 41, 5 bis 13). Die Zahl der Sporen eines Sporangiums bewegt sich in den Grenzen von über 400 bei Hymenophyllum Tunbridgense bis zu 32 bei Trichomanes pinnatum. Keine andere Farnfamilie zeigt eine solche Variation ihrer Merkmale. Die höhere Zahl verbindet sie mit den primitiveren Simplices, die kleinere mit relativ geförderten Typen der leptosporangiaten Farne. Diese Tatsachen sind bedeutsam in Beziehung auf die oben erwähnten anatomischen Vergleiche.

Das Prothallium von Hymenophyllum stellt eine breite, bandförmige Zellfläche dar; bei Trichomanes ist es gewöhnlich fadenförmig und trägt „Archegoniophoren"

Fig. 42. Trichomanes rigidum. Teil des Prothalliums mit einem Archegoniophor, an welchem noch eine junge Pflanze sitzt. Nach Goebel.

Digitized by Google

von mehr oder weniger massiver Struktur (Fig. 42). Da die Archegonien keine eigentümlichen Besonderheiten zeigen, die Antheridien jedoch denen der Gleicheniaceae ähneln, so ist die Gestalt des Prothalliums sehr wahrscheinlich das Ergebnis der Anpassung an feuchte Bedingungen, die parallel der Anpassung des Sporophyten geht. Die Hymenophyllaceae sind also wohl ziemlich frühen Ursprungs; sie stellen aber einen blind endigenden Zweig dar, der charakterisiert ist durch die Annahme eines hygrophilen Habitus in beiden Generationen, bewirkt durch Verminderung der Zahl der Zellschichten. Trichomanes zeigt in beiden Generationen die weitergehende Vereinfachung, es hat sich also wohl mehr entfernt von der Stammform, die wahrscheinlich zu verbinden ist mit marginalen Typen wie die Schizaeaceae, und möglicherweise auch die Ophioglossaceae und Zygopterideae.

9. Die Thyrsopteris Loxsoma Dicksonia - Dennstaedtia - Davallia-Reihen. Das sind alles Farne mit im wesentlichen marginalen Sori, wenigstens dem Ursprung nach; manche ihrer Formen zeigen jedoch mehr oder weniger deutlich eine Verschiebung des Sorus gegen die Blattunterseite hin, was am stärksten ausgeprägt erscheint bei den abgeleiteten Davalliaceae. Es handelt sich hier um Farne, bei denen in mehrfacher Hinsicht eine Fortentwickelung zu bemerken ist: so in dem Uebergang von Haaren zu Schuppen, von der solenostelen zur dictyostelen Struktur der Achse, von der ungeteilten zur geteilten Blattspur, vom gradaten Sorus zu dem der Mixtae, und endlich vom schiefen zum vertikalen Annulus. Diese Progressionen verlaufen zum größten Teil parallel, während die Lage der Sori und die allgemeinen Charaktere beibehalten werden, so daß wir es hier wohl sicher mit echten phyletischen Reihen zu tun haben.

9a) Thyrsopteris und Loxsomopsis. Thyrsopteris, ein monotypisches Genus, wird dargestellt durch Thyrsopteris elegans auf Juan Fernandez. Farne desselben Typus scheinen schon zur Zeit des Jura existiert zu haben. Thyrsopteris ist ein niedrig wachsender Baumfarn, mit 3- bis 4fach gefiederten Blättern und Haaren. Der Bau des Gefäßsystems ist, soweit man ihn kennt, verhältnismäßig primitiv. Die Sori sind vom Dicksoniatypus; die Sporangien stehen basipetal, das erste wird streng marginal gebildet. Die großen Sporangien haben einen schiefen Annulus, der aus vielen Zellen besteht, ein Stomum fehlt. Die Sporenzahl schwankt zwischen 48 und 64. Die Verwandtschaft mit Dicksonia liegt klar zutage; doch ist es besser, Thyrsopteris getrennt zu halten, da das Sporangium im Annulus und

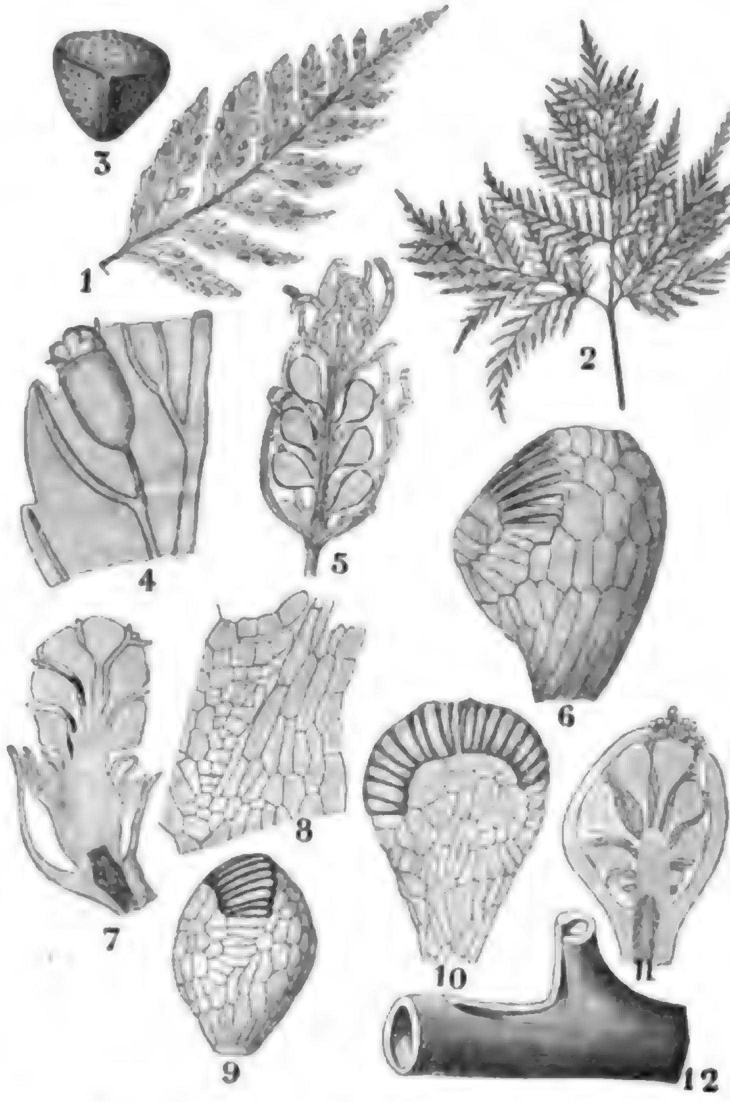


Fig. 43. Loxsoma Cunninghami. Habitus und Sporangienentwickelung. 1 Fieder mit Aderung und Soris. Nach Diels. 2 Blatt, nach einem Exemplar in dem Leidener Reichsherbarium. 3 Spore. 4 Teil eines fertilen Segmentes mit Sorus und Indusium. 5 Längsschnitt durch Sorus und Indusium. 6 Sporangium. 3 bis 6 nach Diels. 7 Längsschnitt durch einen halberwachsenen Sorus. 8 Längsschnitt durch die Basis der Placenta, die jungen Sporangien zeigend. 9 Sporangium mit dem nur teilweise verdickten Annulus, von der Seite gesehen. 10 Dasselbe, aber an der Oeffnungsstelle gesehen. 11 Junger Sorus noch im Indusium eingeschlossen. 7 bis 11 nach Bower. 12 Stammstele mit Blattlücke. Nach Gwynne-Vaughan.

Digitized by Google

Stomum alte Merkmale aufweist. Diese Eigentümlichkeiten finden wir auch bei Loxsomopsis, einem von Christ in Costa Rica neu entdeckten Genus, das jedoch erst noch genau untersucht werden muß, ehe ihm sein Platz endgültig zugewiesen werden kann.

Hierher soll auch Loxsoma Cunninghamii R. B. gerechnet werden, die in Neu-Seeland endemisch wächst. Diese Pflanze hat den Habitus einer lederigen Davallia und trägt Sori wie Trichomanes; von beiden unterscheidet sie sich dadurch, daß ihre Sporangien in einer Medianebene aufspringen. Man betrachtet sie am besten als den einzigen lebenden Vertreter eines besonderen Tribus, der verwandt ist einerseits mit den Schizaeaceae, andererseits mit den Hymenophyllaceae und den Dicksonieae.

Das kriechende Rhizom der Pflanze ist solenostel, die Blattspur ungeteilt (Fig. 43, 12). Die kahlen Blätter sind zwei- oder dreifach gefiedert, unterseits sind sie graublau (Fig. 43, 1 und 2). Die Sori sind marginal, jeder sitzt am Ende einer Ader und hat ein basales, schüsselförmiges Indusium. Das säulenförmige Receptakulum trägt eine basipetale Folge von Sporangien (Fig. 43, 4 bis 8), deren jedes ungefähr 64 Sporen enthält. Das Sporangium hat einen unvollkommenen Annulus, der nur am distalen Ende verdickt ist; es öffnet sich durch einen medianen Riß (Fig. 43, 6, 9 und 10). Das ist eine Reminiszenz an primitive Typen wie die der Schizaeaceae.

9b) Dicksonieae. Die 3 Genera der Dicksonieae, Balantium, Dicksonia und Cibotium, umfassen ungefähr 30 Arten. Einige davon sind große Baumfarne, andere von niedrigerem, aber doch vorherrschend radiärem Bau. Die kleineren Formen ähneln Thyrsopteris in den Blättern, der Haarbedeckung und den marginalen Sori; die größeren, dendroiden Species sehen aus wie Cyathea, von dem sie sich jedoch leicht unterscheiden lassen, auch die sterilen Pflanzen, durch die Bedeckung mit Haaren gegenüber den Ramenta der Cyatheaceae. Auch sind ihre Sori marginal, die von Cyathea dagegen superfizial. Die beiden Phyla sind wohl völlig zu trennen, wenn auch beide dendroide Form erreichen.

Das Gefäßsystem stellt eine, von einer Solenostele kaum verschiedene Dictyostele dar; die Blattlücken überdecken einander nur wenig. Von der Basis jeder Blattlücke entspringt ein breiter, bandförmiger, eingebogener Gefäßstrang, der sich bald in zahlreiche kleinere Stränge teilt, die hufeisenförmig angeordnet sind (Fig. 44, 10). Bei der verwandten Dennstaedtia mit kriechendem Rhizom ist, wie wir sehen werden, die Achse solenostel; offenbar hängt der Uebergang von der Solenostele zur Dictyostele bei Dicksonia zusammen mit der Erwerbung des aufrechten Habitus. Die aufrechte Achse erhält die nötige mechanische Festigkeit durch sklerotische Gewebselemente, die das Leitungsgewebe begleiten.

Die Sori sind der Entstehung nach streng marginal, und darin entsprechen sie im

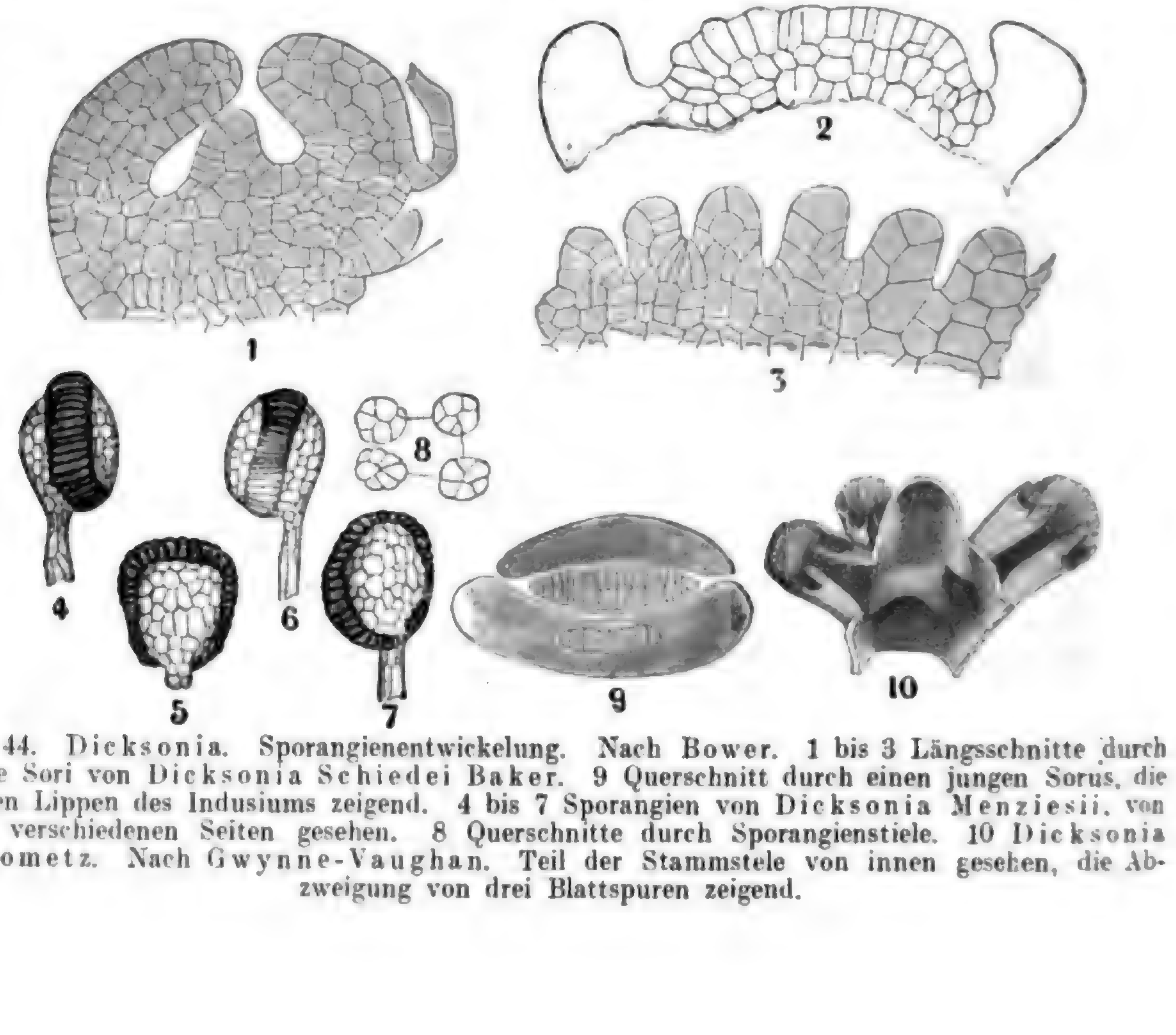


Fig. 44. Dicksonia. Sporangienentwickelung. Nach Bower. 1 bis 3 Längsschnitte durch junge Sori von Dicksonia Schiedei Baker. 9 Querschnitt durch einen jungen Sorus, die beiden Lippen des Indusiums zeigend. 4 bis 7 Sporangien von Dicksonia Menziesii, von vier verschiedenen Seiten gesehen. 8 Querschnitte durch Sporangienstiele. 10 Dicksonia Barometz. Nach Gwynne-Vaughan. Teil der Stammstele von innen gesehen, die Abzweigung von drei Blattspuren zeigend.

Digitized by Google

wesentlichen denen der Hymenophyllaceae, doch ist ihr Indusium deutlicher zweilippig mit ungleich großen Lippen (Fig. 44, 1 und 9). Aus dem Blattrand entsteht das zungenförmige Receptakulum, das zwischen den Lippen des Indusiums liegt; auf seinem Rand erscheint das erste Sporangium (Fig. 44, 3). Auf dieses folgen andere in basipetaler Reihenfolge. Das reife Sporangium ist ziemlich lang gestielt und hat einen sehr schiefen Annulus; es springt lateral auf. Die typische Sporenzahl ist 64.

Aus der Struktur wie auch aus der Beschaffenheit des Sorus und des Sporangiums ergibt sich eine enge Verwandtschaft der Dicksonieae mit Thyrsopteris. Durch 4 bis 6). Die Sori sind meistens kreisförmig und haben ein zylindrisches, streng marginales Receptakulum (Fig. 45, 2 und 3), auf welchem die langgestielten Sporangien gewöhnlich in basipetaler Reihenfolge entstehen. Der Annulus ist nahezu vertikal, die Dehiszenz lateral und quer. Der Annulus ist noch ein klein wenig schief, woraus sich schließen läßt, daß die Stammform einen schiefen Annulus besaß. Sowohl bei Dennstaedtia als auch bei Microlepia findet man Abweichungen von der streng basipetalen Reihenfolge der Sporangien, wie sie für die Gradatae charakteristisch ist. Junge Sporangien erscheinen unregelmäßig eingestreut zwischen die älteren. Wir sehen hier

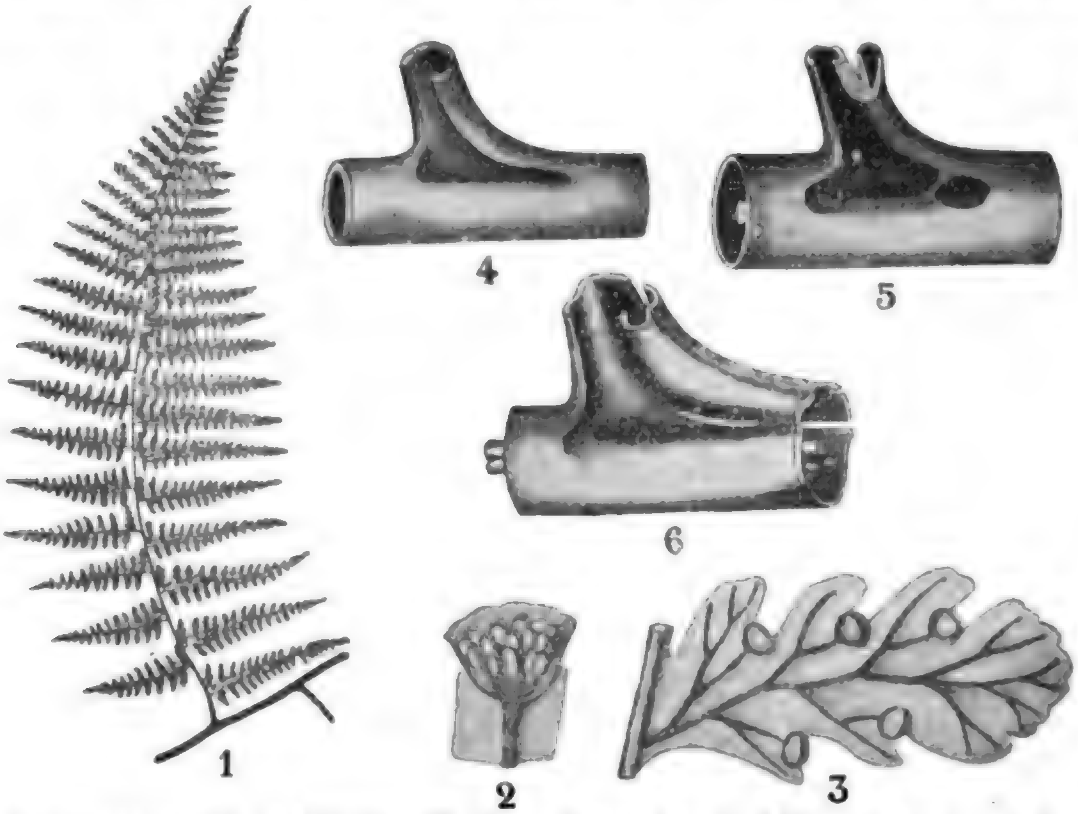


Fig. 45. Dennstaedtia apiifolia. Habitus, Sporangien, Gefäßbündelverlauf. 1 Blattfieder erster Ordnung. 2 und 3 Dennstaedtia cicutaria. Nach Baker. 2 Längsschnitt eines Sorus. 3 Fertile Fiederchen. 4 bis 6 Anatomie. Nach Gwynne-Vaughan. 4 Dennstaedtia punctiloba. Diagramm des Rhizoms, einen Knoten mit der Basis einer Blattspur zeigend. 5 Dasselbe von Dennstaedtia apiifolia. 6 Dasselbe von Dennstaedtia rubiginosa.

Loxsomopsis und Loxsoma sind sie, jedoch weniger nahe, auch verwandt mit den Hymenophyllaceae und anderen, noch primitiveren Formen. Nach oben hin schließen sie sich eng an die Dennstaedtiinae u. a.

9c) Dennstaedtiinae. Dieser Subtribus wurde aufgestellt von Prantl, um die Genera Dennstaedtia, Microlepia, Hypolepis und einige andere zusammenzufassen. Dennstaedtia ist dem Wesen nach ein kriechender Dicksoniatypus mit einzelstehenden, stark verzweigten Blättern, die offen geadert und mit Haaren, nicht Schuppen, bedeckt sind. Die Achse hat eine deutliche Solenostele, in manchen Fällen finden sich noch innerhalb steläre Gewebszüge (Fig. 45, Uebergangsstadien zu den Mixtae. So nehmen die Dennstaedtiinae eine interessante Zwischenstellung ein. Die Systematiker schließen sie auf der einen Seite an die gradaten Dicksonieae, auf der anderen an die mixten Davallieae an; die soralen Merkmale zeigen Uebergänge zwischen beiden. Sie haben jedoch die primitivere Behaarung beibehalten und tragen keine Schuppen.

9d) Davallieae. Diese Familie umschließt eine Anzahl von Farnen, die so eng zusammenhängen, daß sie verschiedentlich in Genera angeordnet worden sind. Es ist wohl möglich, daß die von Diels (Natürliche Pflanzenfamilien I, 4, S. 205) unter diesem Namen zusammengestellten

Digitized by Google

Gattungen mehrere konvergente Reihen darstellen. Wie er selbst jedoch zugibt, bedarf die ganze Gruppe einer kritischen Nachprüfung. Die allgemeinen Charaktere sind folgende: es sind rhizomatische Farne mit einzelstehenden, oft reich verzweigten Blättern. Statt der Haare finden wir hier Schuppen. Die Achse wird durchsetzt von einer Dictyostele, die oft „Perforationen" aufweist. Die Blattspur verläuft von Anfang an in 2 getrennten Strängen. Der Sorus ist typisch marginal, kann aber infolge der extremen Ungleichheit der Lippen des Indusiums superfizial erscheinen. Das Receptakulum ist flach, Sporangien verschiedenen Alters stehen untereinander gemischt (Fig. 46). Die Sporangien sind langgestielt, der Annulus ist vertikal, die Dehiszenz lateral und quer. Die Sporenzahl beträgt bei Davallia speluncae 64 in jedem Sporangium. Aus all diesen Merkmalen ist eine fortgeschrittene Stellung der Davallieae zu erkennen, doch sind sie offenbar noch verwandt mit den primitiveren Dennstaedtiinae und Dicksonieae. Man kann wohl annehmen, daß die eben genannten Farne eine natürliche Reihe oder Schar bilden, wenn auch nicht notwendig längs einer einzigen oder kontinuierlichen phyletischen Linie. Diese Reihe umfaßt Formen mit typisch marginalen Sori; die Stammform war wahrscheinlich verwandt mit den Schizaeaceae. Das schüsselförmige oder gelappte Indusium ist offenbar von derselben Natur wie die schützenden Wachstumsgebilde, die wir in dieser Familie finden. Die Formen dieser Reihe schreiten fort vom gradaten zum mixten Typus der Sori, vom schiefen zum vertikalen Annulus, vom solenostelen zum hoch entwickelten dictyostelen Bau der Achse. Durch den Parallelismus, den diese verschiedenen Linien der Fortentwickelung zeigen, erhalten die oben behaupteten allgemeinen Schlüsse eine starke Stütze.

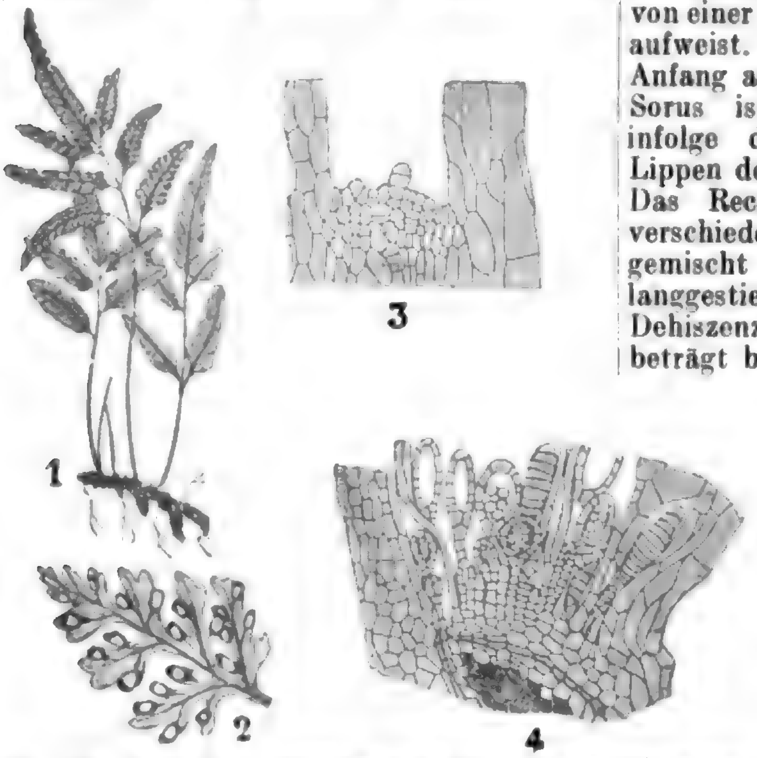


Fig. 46. Davallia. Habitus und Sporangienentwickelung. 1 Davallia pentaphylla Bl. Nach Diels. 2 Davallia canariensis Sw., Fieder 3. Ordnung mit Aderung und Sori. Nach Diels. 3 und 4 Davallia Griffithiana Hk. Nach Bower. 3 Junger Sorus im Längsschnitt, die ersten Anlagen der Sporangien zeigend. 4 alter Sorus, junge und alte Sporangien gemischt zeigend.

10. Heterospore Typen.

a) Marsiliaceae. Die Marsiliaceae sind am besten im Anschluß an die leptosporangiaten Farne mit marginalen Sori zu behandeln. Sie werden gewöhnlich in die Hydropterideae eingereiht, d. s. was erlebende Pflanzen, die sich von den anderen Farnen dadurch unterscheiden, daß sie getrennte männliche und

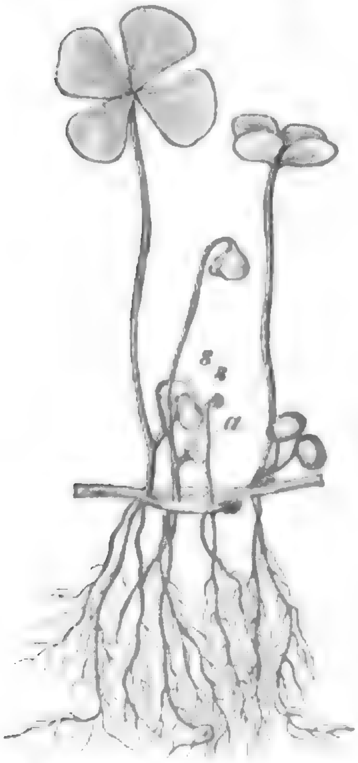


Fig. 47. Marsilia quadrifoliata. a junges Blatt, s Sporocarpien. Nach Bischoff. Verkleinert.

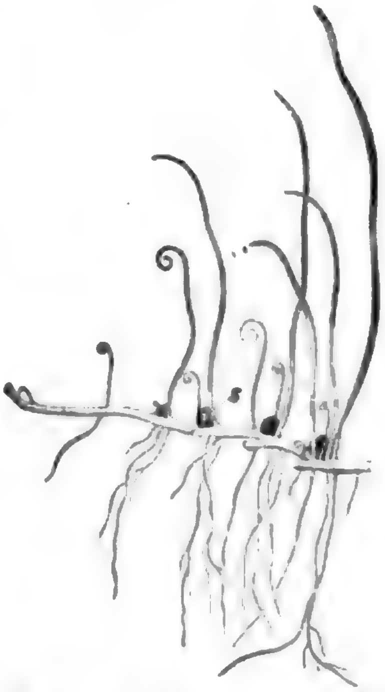


Fig. 48. Pilularia globulifera. s Sporacarpe. Nach Bischoff. Verkleinert.

Digitized by Google

weibliche Sporen haben (heterospor). Wir werden sehen, daß sie wahrscheinlich verwandt sind mit den Schizaeaceae. Die Familie umfaßt 2 Genera, Marsilia (Fig. 47) und Pilularia (Fig. 48), mit ungefähr 60 Species, die weit verbreitet sind. Es sind bewurzelte Pflanzen, die an nassen Standorten oder submers leben; sie haben kriechende Rhizome und Blätter von reduziertem Typus, die jedoch die Einrollung im Jugendzustand beibehalten haben. Aeußerlich treten am stärksten hervor die Sporocarpien. Bei Marsilia sind das bohnenförmige gestielte Körper, die einzeln oder zu mehreren an dem unteren Teile des Blattstieles sitzen. Die Sporocarpien von Pilularia sind kugelig, und nur je eines Es sind zweierlei Sporangien vorhanden: die Megasporangien, deren jedes nur eine einzige Megaspore enthält, und die zahlreicheren Microsporangien, von denen jedes 64 Microsporen erzeugt. Das reife Sporocarp öffnet sich im Wasser infolge des Verschleimens des inneren Gewebes und die Wände der Sporangien werden aufgelöst. Ein mechanisch wirkender Annulus ist also nicht nötig; jedoch hat Campbell bei Pilularia americana Spuren eines terminalen Annulus gefunden, ähnlich dem der Schizaeaceae; auf die Verwandtschaft mit dieser Gruppe weisen auch die marginale Entstehung und die Einzelheiten der Entwickelung hin.

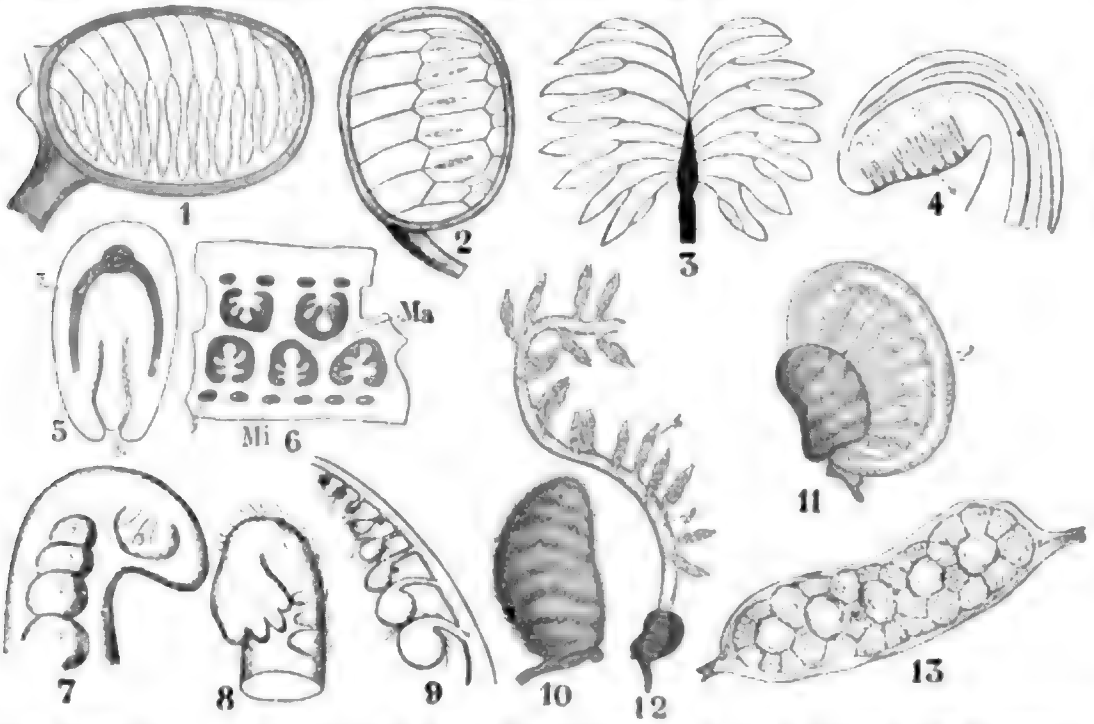


Fig. 49. Marsilia. Sporangien und deren Entwickelung. 1 bis 3 Verlauf der Seitenadern der Frucht. 4 Medianer Längsschnitt einer sehr jungen Frucht. 5 Querschnitt einer solchen. 6 Teil eines Längsschnittes senkrecht auf Fig. 4. Ma Makrosporangien, Mi Mikrosporangien, Sk die Ausfuhrkanäle der Sori, F Gefäßbündel. 7 bis 9 Marsilia polycarpa. Nach Göbel. 7 Junges Sporophyll von der Seite. F Anlage eines Fiederblättchens, S junge Sporocarpien. 8 Junges Sporophyll von oben. 9 Unterer Teil eines Sporophylls mit 8 Sporocarpien. 10 bis 13 Marsilia Salvatrix. Nach Göbel. 10 Frucht. 11 Eine in Wasser aufgesprungene Frucht läßt einen Gallertring hervorkommen. 12 Der Gallertring G ist zerrissen und ausgestreckt. Sr die Sorusfächer. 13 Ein Fach mit seinem Sorus aus einer reifen Frucht. Ma Makrosporangien, Mi Mikrosporangien.

ist der Basis jedes Blattes seitlich angeheftet. Der Bau und die Entwickelung dieser Organe zeigen, daß sie stark modifizierte Fiedern sind, was noch klarer wird durch den vaskularen Zusammenhang (Fig. 49, 1 bis 5). Die kriechende Achse enthält eine Solenostele vom reduzierten Typus, daran schließen die ungeteilten Blattspuren sich an. Das Blatt von Marsilia hat gegabelte Aderung ohne Netzverschmelzungen. Das alles zusammen mit der Haarbedeckung und dem Fehlen der Ramenta deutet auf einen primitiven Zustand hin.

Die Sori sitzen in Höhlungen des Sporocarps; der Entstehung nach sind sie marginal an den reduzierten Fiedern (Fig. 49, 3).

Die Keimung der Sporen, die zusammen ausgestreut werden, geht sehr rasch vor sich. Aus den Microsporen entstehen Prothallien mit kaum mehr als 2 Antheridien, die Spermatocyten enthalten (Fig. 50, 4, 5). Die großen Megasporen enthalten ein Nährgewebe; am apikalen Ende wird ein winziges Prothallium (Fig. 51, 7–9) gebildet, das ein einziges Archegonium trägt (Fig. 51, 10). Nach der Befruchtung des Eies durch die langen, spiraligen Spermatozoiden (Fig. 50, 7) entsteht ein Embryo von der bei Farnen üblichen Gestalt. Der Entwickelungsgang ist also der eines Farnes; jedoch in Uebereinstimmung mit dem Standort und der Erwerbung der Heterosporie sind die

Digitized by Google

Einzelheiten modifiziert. Die Marsiliaceae können demgemäß als spezialisierte Formen betrachtet werden, die anzuschließen sind an Farne mit marginalen Sori und besonders an die Schizaeaceae.

Die bisher betrachteten Reihen der leptosporangiaten Farne zeigten alle die marginale Stellung der Sori; wenn bei den höher entwickelten Formen von Davallia eine superfiziale Stellung zustande kommt, so ist das zweifellos ein abgeleiteter Zustand. Die marginale Stellung ist auch charakteristisch für die primitiven Schizaeaceae, mit denen die oben spezifizierten Leptosporangiaten wahrscheinlich in gewissem Maße verwandt sind. Weiterhin

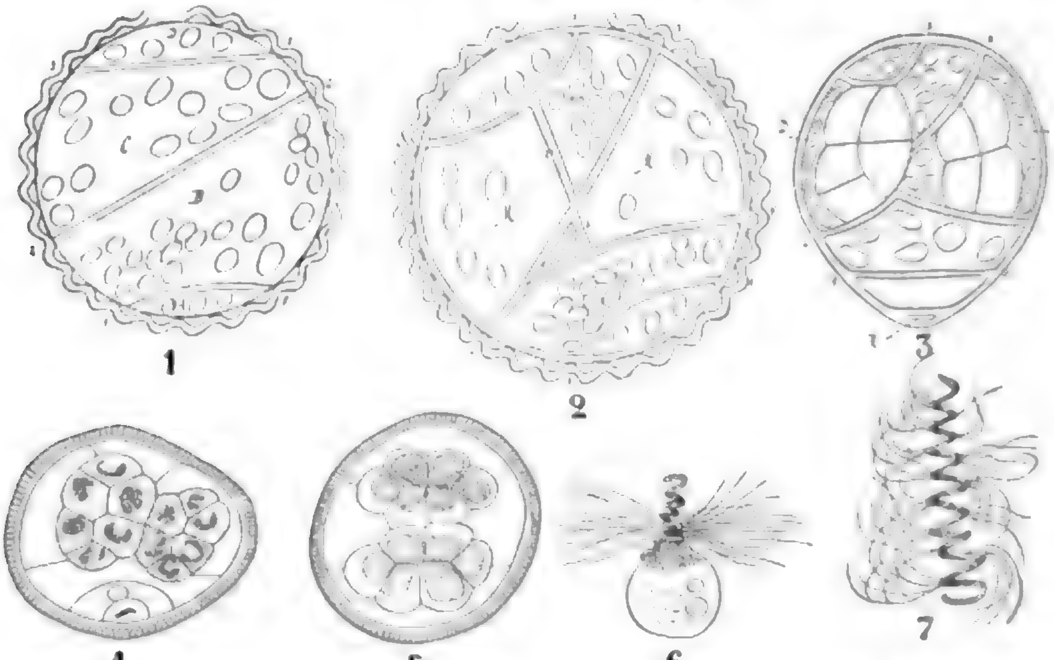


Fig. 50. Marsilia vestita. Entwickelung des Mikroprothalliums und der Spermatozoen. Nach Belajeff und Campbell.

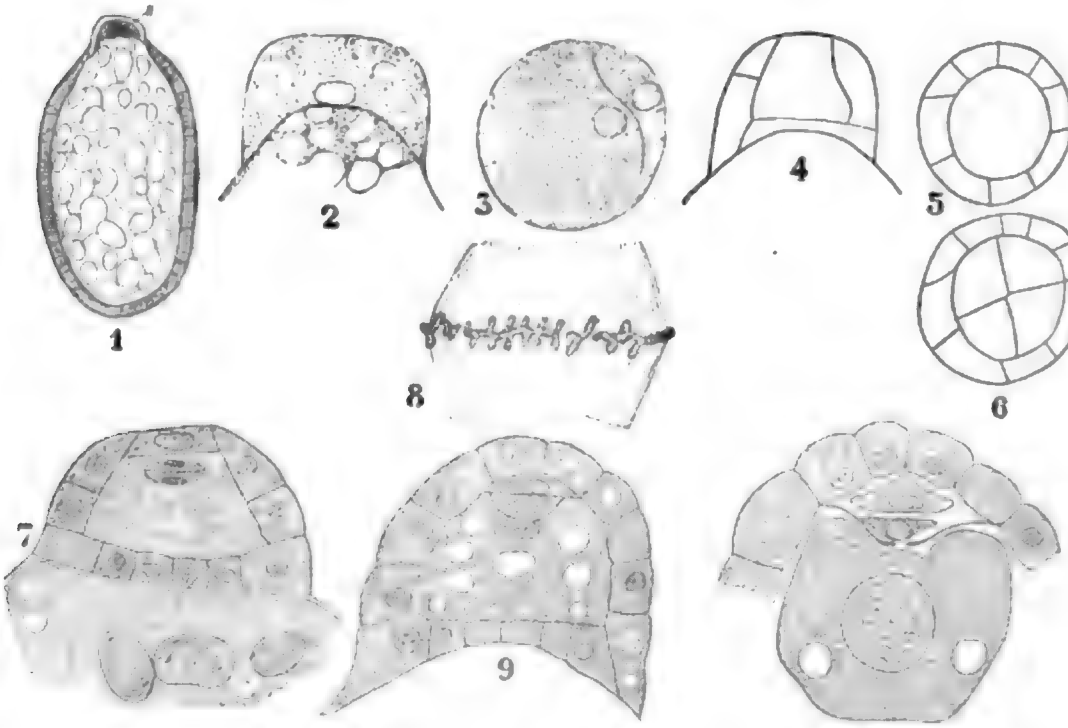


Fig. 51. I. Marsilia vestita. Keimung der Makrospore. 1 Längsschnitt durch eine reife Makrospore. N Nucleus. 2 bis 6 nachfolgende Stadien in der Entwickelung des weiblichen Prothalliums und Archegoniums. Nach Campbell. II. Marsilia Drummondii. 7 Medianer Längsschnitt einer Prothalliumanlage, Teilungsschritt zur Anlage der Halskanalzelle. 8 Die Kernspindel für die Anlage der Bauchkanalzelle. 9 Längsschnitt nach Anlage einer zweiten Kanalzelle. 10 Reifes Archegonium, eine Hals- und eine Bauchkanalzelle, die Scheidewand über dem Ei in der Mitte verquollen. Nach Strasburger.

Digitized by Google

haben die indusialen Schutzgebilde alle die Natur von Auswüchsen der intramarginalen Blattoberfläche, wie wir sie bei den Schizaeaceae finden, so bei Lygodium und in geringerem Grade bei Mohria.

Wir gehen nun über zu den leptosporangiaten Farnen, bei denen die Stellung der Sori superfizial ist, die also in dieser Hinsicht den Gleicheniaceae und den Matonineae entsprechen. Wir werden sehen, daß die indusialen Schutzgebilde dieser Gruppe, wenn auch im einzelnen der Beschaffenheit und dem Ursprung nach variierend, doch insgesamt sich unterscheiden von jenen, die für die marginalen Reihen charakteristisch sind. Es sollen nun nacheinander diese verschiedenen Reihen betrachtet werden.

11. Die Matonia-Dipteris-Cheiropleuria-Platycerium-Reihe. Die Aufstellung dieser Reihe beruhte bisher nur auf der Vergleichung allgemeiner, äußerer Merkmale. Die ins einzelne gehende Untersuchung wird die Gültigkeit derselben nachzuweisen haben.

Das Genus Dipteris wurde lange Zeit zu Polypodium gerechnet wegen seiner nackten, superfizialen Sori. Heute wird es als der einzige lebende Vertreter der Dipteridinae angesehen und an die Matonineae angeschlossen. Wir kennen 4 lebende Species aus der Indo-Malaiischen Flora; diese zeigen eine interessante Progression der Merkmale des Blattes und des Sorus. Sie haben alle, wie Matonia, kriechende Rhizome mit gelegentlicher Dichotomie; Achse und Blätter sind mit Haaren bekleidet. Die Blätter sind dichotom verzweigt, sie lassen einen Fortschritt erkennen in der netzförmigen Aderung (Fig. 52, 3 und 4). Dipteris Lobbiana hat schmale Segmente, mit je einer Reihe von Sori zu beiden Seiten der Mittelrippe. Dipteris quinquefurcata und L. Wallichii nehmen eine Mittelstellung ein; sie führen hinüber zu der breitblätterigen Dipteris conjugata (Fig. 52, 1 bis 3), bei der sehr zahlreiche Sori über die breite, netzaderige Blattfläche zerstreut sind. Die Achse ist solenostel, ähnlich wie die von Matonia, jedoch weniger kompliziert; die Blattspur ist gewöhnlich ungeteilt. Am interessantesten sind die Sori. Im allgemeinen sind sie gebaut wie die von Matonia; jedoch es fehlt ein erhöhtes Receptakulum und das Indusium; sie enthalten ferner mehr Sporangien, die ganz unregelmäßig angeordnet sind. Bei Dipteris Lobbiana entstehen noch die Sporangien eines Sorus simultan: bei Dipteris conjugata, wo die zahlreichen Sori über die Blattfläche verstreut liegen, entstehen neue Sporangien zwischen den zuerst gebildeten. Wir haben hier den direkten Uebergang vom Typus der Simplices zu dem der Mixtae, ohne die gradate Zwischenstufe; die allgemeine Beschaffenheit der Sori nähert sich der für Acrostichum charakteristischen. Das einzelne Sporangium ist klein und hat einen schiefen Ring, dessen Zellen bis zur Ansatzstelle des Stieles verdickt sind. Laterale Dehiszenz, Sporenzahl 64.

Wir haben hier also eine Progression

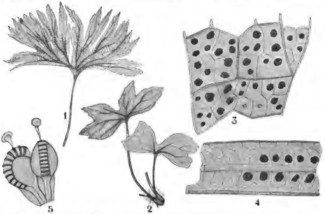


Fig. 52. Dipteris. 1 bis 4 Dipteris conjugata (Kaulf.) Reinw. 1 Blatt einer erwachsenen Pflanze. Nach Kunze. 2 Habitusbild einer jungen Pflanze. Nach Diels. 3 Unterseite eines fertilen Blattes mit Aderung und Soris. Nach Kunze. 5 Sporangien und Paraphysen. Nach Kunze. 4 Dipteris Lobbiana (Hook.) Moore. Teil eines fertilen Segmentes mit Aderung und Soris. Nach Diels.

vom Typus der Simplices direkt zu dem der Mixtae, in einer durch andere Charaktere als natürlich erkannten Reihe. Es handelt sich hier um alte Formen; paläontologisch lassen sich die Dipteridinae bis ins Rät zurück verfolgen. Matonia und Dipteris sind verwandte, alte Formen: erstere zeigt eine hohe Entwickelung ihres Gefäßsystems, letztere eine solche ihrer Sori.

Die Genera Cheiropleuria und Platycerium können als weitere Abkömmlinge der Matonineae betrachtet werden, die zu Epiphyten spezialisiert sind. Das muß jedoch erst noch genauer geprüft werden.

12. Die Gleichenioid-Cyatheoid-Aspidioid-Reihe. 12a) Die Cyatheoideae. Sehr wahrscheinlich war die Stammform der Cyatheoideae und zuletzt auch der Aspidioidfarne verwandt mit den Gleicheniaceae. Annahmen dieser Art finden eine gute Stütze, wenn es gelingt, verbindende Glieder, oder, wie man auch sagt, synthetische Typen, zu finden, mit deren Hilfe man die Beziehungen zwischen Reihen erkennen kann, die ohne sie weit auseinander zu stehen scheinen. Im vorliegenden Fall nun haben wir einen solchen synthetischen Typus, nämlich Lophosoria, das die Gleicheniaceae mit den Cyatheaceae verbindet. Alle diese Farne stimmen überein in der superfizialen Stellung der Sori; bei den primitiveren Formen fehlt ein Indusium, statt dessen stehen die relativ wenigen Sporangien radial um ein vorspringendes Receptakulum.

Es ist gezeigt worden, daß Gleichenia linearis und Gleichenia pectinata sich von den anderen Gleichenien unterscheiden in folgenden Punkten: sie tragen Haare, der Bau der kriechenden Achse kann bis zu solenostelen Strukturen entwickelt sein, die Blattspur ist ungeteilt; sie haben eine größere Zahl von Sporangien im Sorus und einen geringeren Sporenertrag im Sporangium. Dadurch sind sie gegenüber den anderen Formen des Genus als fortgeschrittene Typen zu erkennen. Ihnen gegenüber stehen die Cyatheaceae; das sind Baumfarne mit aufrechter, massiver Achse und einem endständigen Büschel von Blättern (Fig. 53); sie haben Ramenta, dictyostelen Bau des Stammes, geteilte Blattspur; die Sporenzahlen sind sehr nieder, 32, 16 oder gar nur 8 im Sporangium; die Sporangien stehen in basipetaler Reihe am Receptakulum. Der synthetische Typus Lophosoria nimmt nun eine Mittelstellung zwischen beiden ein. Es ist ein monotypischer, niedrig wachsender Baumfarn der westlichen Tropen, oft als eine Alsophila klassifiziert. Von den Blattbasen entspringen horizontale Ausläufer; die Pflanze ist mit Haaren bedeckt; die aufrechte Achse enthält eine Dictyostele, die Ausläufer dagegen sind solenostel; die Blattspur ist ungeteilt; der Sorus ist der der Simplices (Fig. 54), der Annulus aber ist schief, die Dehiszenz lateral, die Sporenzahl 64. Diese Merkmale scheiden den Typus von Alsophila, daher wird er besser als Lophosoria Presl. abgetrennt. Man kann ihn betrachten als einen Abkömmling der Gleicheniaceae, der die aufrechte Achse angenommen hat und die Blattentwickelung abgekürzt hat. Der Uebergang

Fig. 53. Cyathea dealbata. Doppelstämmiges Exemplar aus dem botanischen Garten in Glasgow, den Habitus einer Cyathea zeigend. Es hat den Anschein einer Dichotomie, es ist jedoch unmöglich, das mit Sicherheit zu behaupten.

Digitized by Google

zu Alsophila, welches dictyostel ist, geteilte Blattspur, Haare wie auch Ramenta und Sori vom gradaten Typus hat, ist dann leicht zu machen.

Der Habitus der Cyatheaceae ergibt sich aus Figur 53; die dort zu sehende Dichotomie ist jedoch selten und für den Vergleich mit den Gleicheniaceae von Interesse. Der baumförmige Habitus scheint sekundär zu sein; er führt zur massiven Achse mit einer komplizierten Dictyostele und akzessorischen Strängen, während sklerotische Massen die mechanische Festigkeit geben. Von Bedeutung sind vor allem die Sori, die ihre superfiziale Stellung beibehalten. Das Receptakulum ist verlängert; an Stelle der simultanen Entstehung der Sporangien wie bei Gleichenia und Lophosoria tritt eine basipetale Reihenfolge; diese ist angedeutet bei Alsophila, bei Hemitelia und Cyathea deutlich ausgeprägt. Auch in den Schutzgebilden des Sorus ist ein Fortschritt zu erkennen. Alsophila hat nackte Sori, bei Hemitelia ist der Sorus an seiner Basis teilweise umkleidet von einer Schuppe, die einem Ramentum nicht unähnlich ist; bei Cyathea endlich bildet das schüsselförmige Indusium, das dem Genus den Namen gibt und das von der Basis des Receptakulums ausgeht, eine sehr vollkommene Schutzbedeckung der jungen Sporangien (vgl. Fig. 18). Dieses Indusium stellt wahrscheinlich ein modifiziertes Ramentum dar, durch die ganze Familie hindurch. Von Bedeutung ist noch, daß der geringste Sporenertrag im Sporangium, d. h. der fortgeschrittenste Zustand, bei Cyathea zu finden ist, welches Genus auch das höchst organisierte Indusium hat.

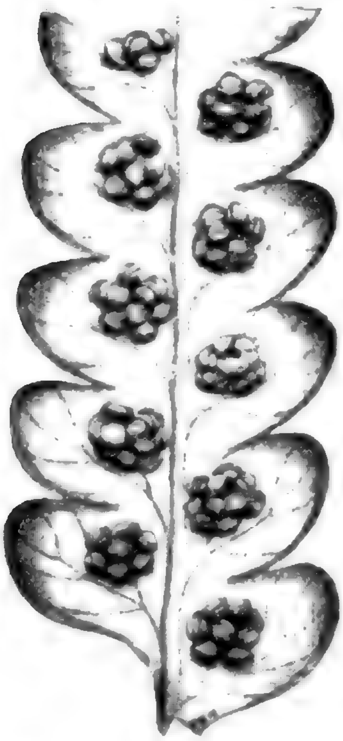


Fig. 54. Lophosoria quadripinnata Gmel. Teil eines Fiederblättchens mit superfizialen Sori, die Sporangien jedes Sorus vom gleichen Alter.

Wir haben so die wahrscheinliche Herkunft der Cyatheaceae erläutert; sie bilden eine sehr natürliche Familie, die offenbar phyletisch ganz zu trennen ist von den Dicksonieae, bei denen der Sorus streng marginal ist. Das hauptsächlichste gemeinsame Merkmal ist der baumförmige Wuchs. Wir kennen 3 Genera: Alsophila, Hemitelia und Cyathea, mit über 400 Arten, die über die Tropen der alten und neuen Welt verteilt sind. Ihre Existenz scheint mehr von den Regenfällen als von der Temperatur abzuhängen. Die außertropische Grenze ihres Verbreitungsgebietes findet sich auf der Stewart-Insel bei Neu-Seeland.

Bis jetzt kennt man noch nicht genügend Material, das das Vorkommen der Cyatheaceae im Paläozoikum bewiese. Im Jura jedoch war weit verbreitet Coniopteris hymenophylloides, ein Farn, der mit großer Wahrscheinlichkeit zu den Cyatheaceae gerechnet werden kann. Dieses fossile Vorkommen würde auch harmonieren mit der phyletischen Mittelstellung, welche die Familie wohl einnimmt.

Die Salviniaceae werden oft mit den Marsiliaceae zusammengestellt als 2. Abteilung der Hydropterideae. Da sie jedoch wahrscheinlich mit diesen Farnen nicht nahe verwandt sind, und da die Aehnlichkeit zwischen beiden als die Folge einer parallel verlaufenden Anpassung an gleiche Lebensbedingungen angesehen werden kann, so scheint es besser zu sein, sie zu näher verwandten Formen zu stellen, nämlich in die Nachbarschaft der Cyatheaceae. Sie umfassen 2 Genera schwimmender Pflanzen, Salvinia und Azolla, mit ungefähr 18 Spezies. Diese Pflanzen haben relativ kleine Blätter, deren Form wenig Farnähnliches hat; jedoch die Einzelheiten der Entwickelung, besonders die Teilungen am Scheitel, sowie die ersten Stadien der Sporangien, lassen deutlich den Farncharakter erkennen. Die Blätter von Salvinia sind in Quirlen zu je 3 angeordnet; von diesen sind die zwei schräg nach oben gestellten zu Laubblättern entwickelt, das dritte nach abwärts gerichtete dagegen als wurzelähnliches, absorbierendes Organ ausgebildet (Fig. 55, 1, 2). Der Sproß ist reich verzweigt und zwar monopodial. Beide Genera haben mit den Marsiliaceae gemein den heterosporen Charakter. Bei Salvinia sind die Sori — oder Sporocarpien, wie sie zuweilen genannt werden — kurz gestielte kugelige Körper, die in Bündeln an der Basis der Wasserblätter sitzen. Jeder ist umgeben von einem doppelten „Indusium", ähnlich dem der Cyatheaceae, und enthält zahlreiche Sporangien. Die kleineren Mikrosporangien und die größeren Makrosporangien finden sich in getrennten Sori, die ersteren in größerer Zahl (Fig. 55, 3). Azolla hat ähnliche Sori; jedoch ist nur ein einziges Megasporangium in jedem weiblichen „Sporocarp". Die Sporangien zeigen mehr oder weniger deutlich basipetale Entwickelungsfolge. In jedem Megasporangium ist nur

Digitized by Google

eine einzige Megaspore, die Mikrosporen dagegen entsprechen in ihrer Zahl und Entwickelung den Sporen der leptosporangiaten Farne. Sie werden frei durch Desorganisation der Sporangien. Bei der Keimung bilden sie ein rudimentäres Prothallium mit Antheridien und Spermatozoiden (Figur 55, 5, 6). Auch die weiblichen Sporen

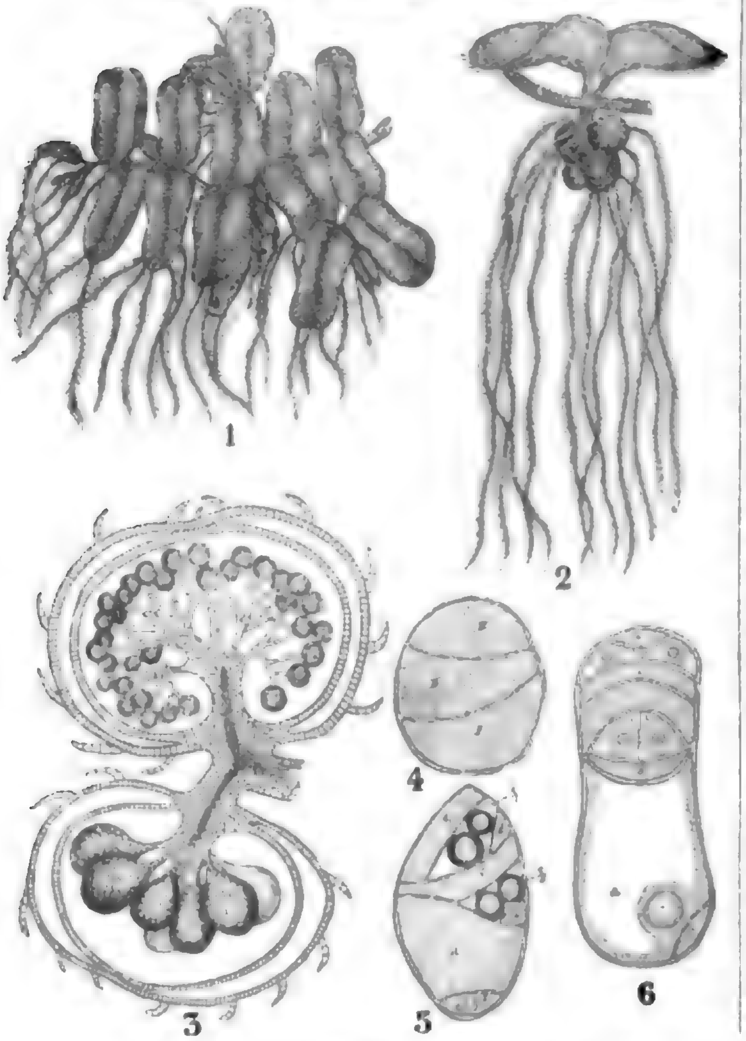


Fig. 55. Salvinia natans. 1 Habitusbild. 2 ein einzelner Blattwirtel, mit Sporocarpien. Beide nach Bischoff. 3 Längsschnitt durch einen Sorus mit Mikrosporangien und einem solchen mit Megasporangien, Nach Luerßen. 4 bis 6 männliche Prothallien. 4 Teilung der Mikrospore in 3 Zellen. 5 fertiges Prothallium von der Flanke. 6 von der Bauchseite. Nach Belajeff.

bilden ein sehr rudimentäres Prothallium mit Archegonien; nach der Befruchtung entsteht aus einem derselben ein Embryo, ähnlich dem eines Farnes, der bei Salvinia wurzellos ist. Die Heterosporie, die wir hier finden, ist offensichtlich ein biologischer Fortschritt gegenüber dem homosporen Zustand, den wir bei den meisten Filicales antreffen.

Zu den Cyatheaceae sind von verschiedenen Systematikern nun noch eine Anzahl anderer Genera mit superfizialen Sori und basalem Indusium gestellt worden. Das sind Struthiopteris und Onoclea, Peranema und Diacalpe, Woodsia und Hypoderris, Cystopteris und Acrophorus. Neuere Nachuntersuchungen dieser Farne, ausgenommen Acrophorus, haben die Gründe für die Annahme einer solchen Verwandtschaft befestigt, sowohl hinsichtlich der Sori wie auch der Anatomie. Es wird demnach wahrscheinlich, daß der Cyatheoidtypus, mit gradatem Sorus und basalem Indusium, keine blind endigende Entwickelungsreihe darstellt. Modifikationen und zwar besonders die Einführung des gemischten Sorus scheinen den Anstoß zur Entwickelung neuer, abgeleiteter Formen gegeben zu haben. Struthiopteris, Onoclea, Woodsia und Cystopteris haben noch den gradaten Sorus beibehalten, dagegen treten bei Hypoderris, Peranema und Diacalpe nun die gemischten Sori auf. Alle diese Formen können als spezialisierte Unterreihen betrachtet werden: Struthiopteris und Onoclea in bezug auf ihr Vorkommen in nördlichen Gebirgen, Peranema und Diacalpe in hohen Lagen der Tropen; Woodsia ist eine Zwergform des Nordens und Hypoderris endlich lebt im Schatten der tropischen Wälder. Cystopteris kommt überall vor, hauptsächlich aber in den gemäßigten Zonen; es ist besonders auch alpinen Lebensbedingungen angepaßt. Für die Vergleichung ist es vielleicht die interessanteste Form.

Schon Swartz und Presl haben Cystopteris mit den Aspidieae verglichen. Die Aehnlichkeit im Habitus ist unverkennbar. Der vaskulare Bau ist fast derselbe wie bei Dryopteris (Nephrodium) Oreopteris. Die Sori und die Indusien gleichen denen der Aspidieae. Beide haben ein vaskulares Receptakulum; ein Medianschnitt durch einen jungen Sorus von Cystopteris ergibt nahezu dasselbe Bild wie bei Dryopteris. Bei ersterem jedoch ist die Reihenfolge der Sporangien die der Gradatae, bei letzterem die der Mixtae. Daraus läßt sich schließen, daß eine Progression von gewissen Cyatheoidabkömmlingen zu den Aspidieae stattfand, charakterisiert durch die Annahme des Merkmals der gemischten Sori. So entstanden die Sori von Hypoderris, Peranema und Diacalpe; eine ähnliche Progression hatten wir schon erkannt in der Dennstaedtia-Davallia-Reihe. Demgemäß wäre die phyletische Stellung der Aspidieae die von Abkömmlingen der Cyatheoidfarne, die den Sorus der Mixtae erworben haben.

12b) Aspidieae. Wir kennen etwa 1000 Arten dieser Reihe, die über die ganze Welt verbreitet sind. Die wichtigsten Genera sind Dryopteris, Aspidium und Polystichum. Dazu nehmen Diels und Christensen noch eine Anzahl kleinerer Genera, von denen aber wohl keines wirk-

Digitized by Google

lich phyletisch zusammenhängt mit den großen Genera. Darüber werden weitere Untersuchungen zu entscheiden haben. Eine zur Darstellung sich gut eignende Form ist Dryopteris (Nephrodium) Filix mas. Diese Farne haben ein kriechendes, schiefes oder aufrechtes Rhizom mit gewöhnlich reich verzweigten Blättern. Die Aderung ist bei vielen offen, ohne Anastomosen; bei einigen, besonders solchen mit breiter Blattfläche, die also wahrscheinlich kondensierte Typen darstellen, kommt Netzaderung vor. Stamm und Blätter tragen zahlreiche Ramenta, bei vielen Formen finden sich aber auch Haare; die Beschaffenheit derselben ist von Christensen zur Einteilung des großen Genus Dryopteris benutzt worden. Die dictyostele Struktur der Achse und die geteilte Blattspur von Dryopteris Filix mas sind wohlbekannt. Die Einzelheiten des vaskularen Baues erleichtern die systematische Anordnung der Familie.

Die Sori sind superfizial; sie sitzen entweder am Ende der Adern oder auf denselben. Bei den einfacheren Formen stehen sie in einer einzigen Reihe parallel dem Rande. Ist das Blatt breit, wie bei den abgeleiteten Typen, so kann auch mehr als eine Reihe da sein. Wir haben schon erörtert, daß der Sorus wohl von dem der Cyatheaceen abzuleiten ist. Die Abänderungen haben offensichtlich biologische Vorteile zur Folge. Zunächst hat der gemischte Sorus gegenüber dem gradaten schon den allgemeinen Vorzug, daß bei ihm die Entleerung sich über einen längeren Zeitraum erstreckt und so die begrenzte Länge des Receptakulums bestmöglich ausgenützt wird. Einen zweiten Vorteil bietet die abgeflachte Gestalt des Receptakulums; es wird dadurch die Einrollung des Blattes in der Knospenlage leichter als da, wo das Receptakulum in die Länge gezogen ist, wie bei Cyathea. Dazu kommt bei Dryopteris noch die seitliche Anheftung des Indusiums. Ein weiterer Fortschritt ist bei Polystichum zu sehen; hier stehen die Sporangien um das ganze Receptakulum herum bis an die Seite desselben, die der Mittelrippe gegenüberliegt. Das Indusium erscheint dann in der wohlbekannten Federballform. Endlich finden wir bei gewissen abgeleiteten Formen eine Modifikation in der Weise, daß das Indusium verkümmert ist; der nackte Sorus ist vom „Polypodioid"-Typus. Das ist der Fall bei Dryopteris (Polypodium) phegopteris, dem Tüpfelfarn. Da wo ein Indusium vorhanden, ist dasselbe ein modifiziertes Ramentum. Die Sporangien sind langgestielt; sie haben einen vertikalen Annulus und ein gut ausgebildetes Stomum; die Sporenzahl ist häufig 48 (Fig. 2 A, B, C).

Die Gleichenioid - Cyatheoid - Aspidioid-Reihe umfaßt also Farne, die übereinstimmend superfiziale Sori tragen. Sie beginnt mit primitiven Formen, die den einfachen Sorus, die protostele Achse und die ungeteilte Blattspur der Gleicheniaceae aufweisen, und endigt bei Farnen mit gemischtem Sorus, dictyosteler Achse und stark geteilter Blattspur, wie die Aspidieae. Dazwischen stehen die Cyatheoidfarne mit gradatem Sorus, verschiedenartig solenosteler Achse und Unterteilungen der ausgedehnten Meristele des Blattstiels. Das Indusium — wo ein solches vorhanden — ist von der Natur eines spezialisierten Ramentums. Eine kritische Untersuchung über die Frage, welches die letzten phyletischen Abkömmlinge der Aspidieae seien, steht noch aus.

13. Die Plagiogyria-Blechnum-Woodwardia-Reihe. Eine andere phyletische Formenreihe, welche die Entwickelung von relativ einfachen zu fortgeschrittenen Farnen zeigt, stellt die von Diels mit dem Namen Blechninae bezeichnete Gruppe dar (Natürliche Pflanzenfamilien I, 4, S. 222). Dazu gehören die Genera Blechnum, Sadleria, Woodwardia und Doodya. Die älteren Systematiker rechneten dazu noch das Genus Plagiogyria, das von Sir W. Hooker sogar in das Genus Lomaria (= Blechnum) eingeschlossen wurde. Neuerdings ist es wieder als getrenntes Genus erkannt worden; es ist ein synthetischer Typus, der die Blechninae mit primitiveren Farnen verbindet.

13a) Plagiogyria. Dieses Genus hat 11 Species, die in den östlichen und westlichen Tropen weit verbreitet sind, besonders im Gebirge.

Die Farne der Gruppe haben eine aufrechte massive Achse, die bedeckt ist von den Basen der dicht stehenden Blätter. Gelegentlich findet sich Dichotomie der Achse. Die Blattbasen sind verbreitert und tragen zahlreiche, vorspringende Pneumatophoren. Die jungen Blattflächen sind bedeckt mit Schleimhaaren, Schuppen fehlen. Die Blätter sind gefiedert, haben einen gezähnten Rand und zeigen offene Aderung. Fertile und sterile Blätter sehen verschieden aus. Die sterilen Blätter sind breiter, die fertilen relativ schmal und haben umgeschlagene Ränder. Letztere bedecken die Sori, die auf den gegabelten Adern sitzen und sonst keinerlei Schutzgebilde haben. Gewisse Species entsenden Ausläufer, die von den Blattbasen entspringen; in ihrem basalen Teil zeigen diese solenostelen Bau. Das ganze Gefäßsystem ist ziemlich primitiv. Das ergibt sich nicht nur aus den solenostelen Ausläufern; der erwachsene Stamm ist wohl dictyostel, jedoch wenig entfernt von einer Solenostele. Die Blattspur tritt als ungeteilter Strang aus. Diese Tatsachen, zusammen mit der Haarbedeckung und der einfach gegabelten Aderung

Digitized by Google

weisen auf einen primitiven Zustand hin (Fig. 56). Das ergibt sich noch deutlicher aus den Sporangien; diese sind groß, langgestielt und bilden ziemlich lockere Sori auf den Adern. Das auffallendste Merkmal ist ihr schiefer Annulus (Fig. 56, B und C) mit lateraler Dehiszenz; die Sporenzahl im Sporangium ist nur 48. Die ersten Sporangien des Sorus erscheinen fast simultan, nachher folgen aber andere, die dazwischen gestreut sind. Der Sorus ist also tatsächlich gemischt, ohne jedes gradate Anzeichen.

Diese Merkmale lassen eine Beziehung zwischen Plagiogyria und den Simplices erkennen, ohne daß ein engerer Anschluß hergestellt werden könnte. Das Genus ist viel näher verwandt mit Blechnum, von dem es sich jedoch durch die Anatomie, die Haare und den schiefen Annulus als primitives Genus abhebt.

13b) Blechnum. Hierher gehören 138 Species, die meist tropisch sind, sich jedoch auch in die nördliche und südliche gemäßigte Zone hinein erstrecken. Viele Species finden sich auf Neu-Seeland. Zu Blechnum wird jetzt auch Lomaria gestellt, das früher wegen der engeren fertilen Blätter davon getrennt gewesen war. Wir werden sehen, daß beide von einem dimorphen Typus, mit engeren fertilen Blättern, so wie bei Plagiogyria, abzuleiten sind. Die Achse dieser Farne ist meistens aufrecht und trägt ein Büschel von Blättern; sie sehen aus wie kleine Baumfarne. Da sie sich leicht kultivieren lassen, werden sie mit Vorliebe in Gewächshäusern ge-

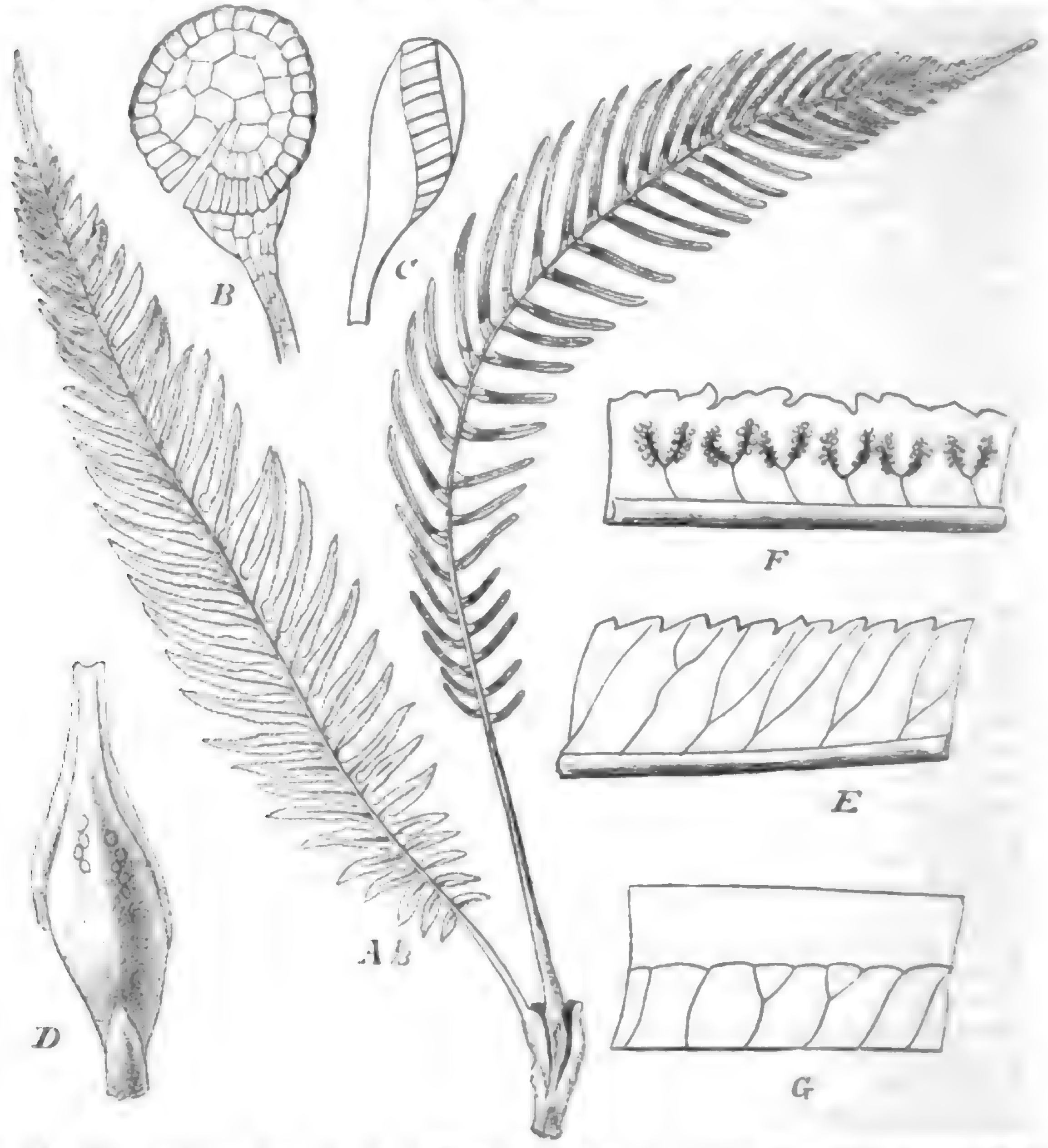


Fig. 56. Plagiogyria Kze. A bis F Plagiogyria semicordata (Presl) Christ. A Habitus. B und C Sporangien, von vorn und von der Seite. D Blattstielbasis. E Fragment des sterilen Blattes, mit Aderung. F Fragment des fertilen Blattes, mit Aderung und Sori. G Plagiogyria scandens (Griff) Mett. Fragment des fertilen Blattes mit Aderung und ausgebreitetem Deckrande. Nach Mettenius.

Digitized by Google

zogen. Die Sektion Lomaria hat streng dimorphe Blätter wie Plagiogyria. Die schmaleren fertilen Blätter haben umgeschlagene Ränder, welche die Sori schützen; letztere sitzen auf den gegabelten Adern und füllen den Raum zwischen Mittelrippe und Blattrand aus. Die Sektion Eu-Blechnum hat weniger streng dimorphe Blätter; zwischen der Reihe der Sori und dem Blattrand bleibt ein großer Zwischenraum. Zwischen diesen beiden Formen finden sich Uebergänge, die es berechtigt erscheinen lassen, daß beide dem Genus Blechnum eingefügt werden.

Der Unterschied zwischen den fertilen Blättern von Lomaria und Eu-Blechnum beruht auf einer Neubildung, die sich Schritt für Schritt verfolgen läßt, wenn man die verschiedenen Species vergleicht. Der ursprüngliche Typus ist ähnlich Plagiogyria, wo der Blattrand sich nach unten über die Sori umbiegt. Bei einigen Species von Lomaria ist das genau so, ohne irgendwelche Verdickung des Blattes an der Stelle der stärksten Krümmung. Bei Blechnum (Lomaria) discolor und einigen anderen jedoch findet sich eine solche Verdickung, die durch nachträgliche perikline Teilungen

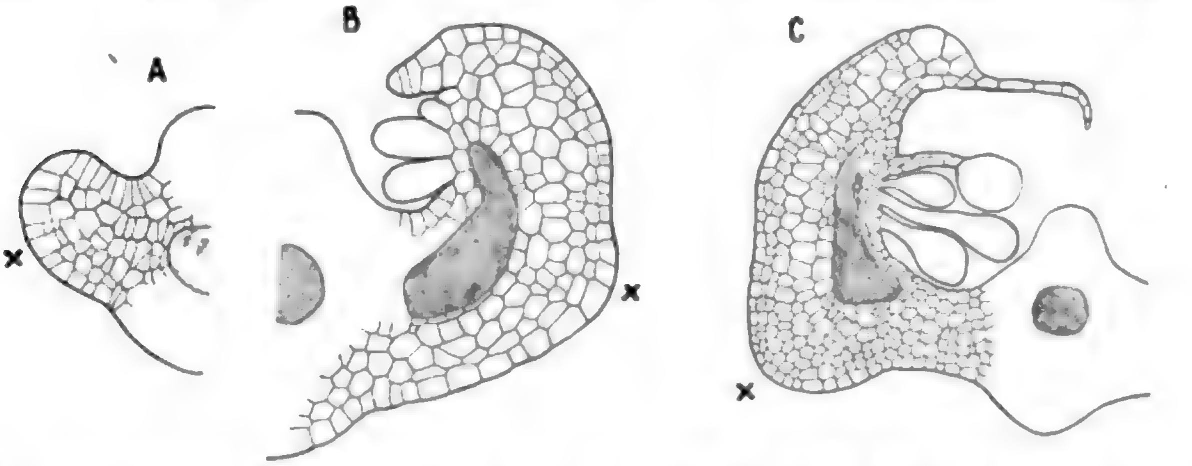


Fig. 57. Blechnum (Lomaria) discolor. A, B, C Schnitte durch fertile Fiedern von verschiedenen Altersstufen. Die abaxiale Oberfläche ist konkav, in den Zeichnungen oben gelegen. Man sieht, wie der eigentliche Rand zum „Indusium" auswächst, und wie eine leichte Verdickung an der Stelle der stärksten Krümmung der Fiedern auftritt.

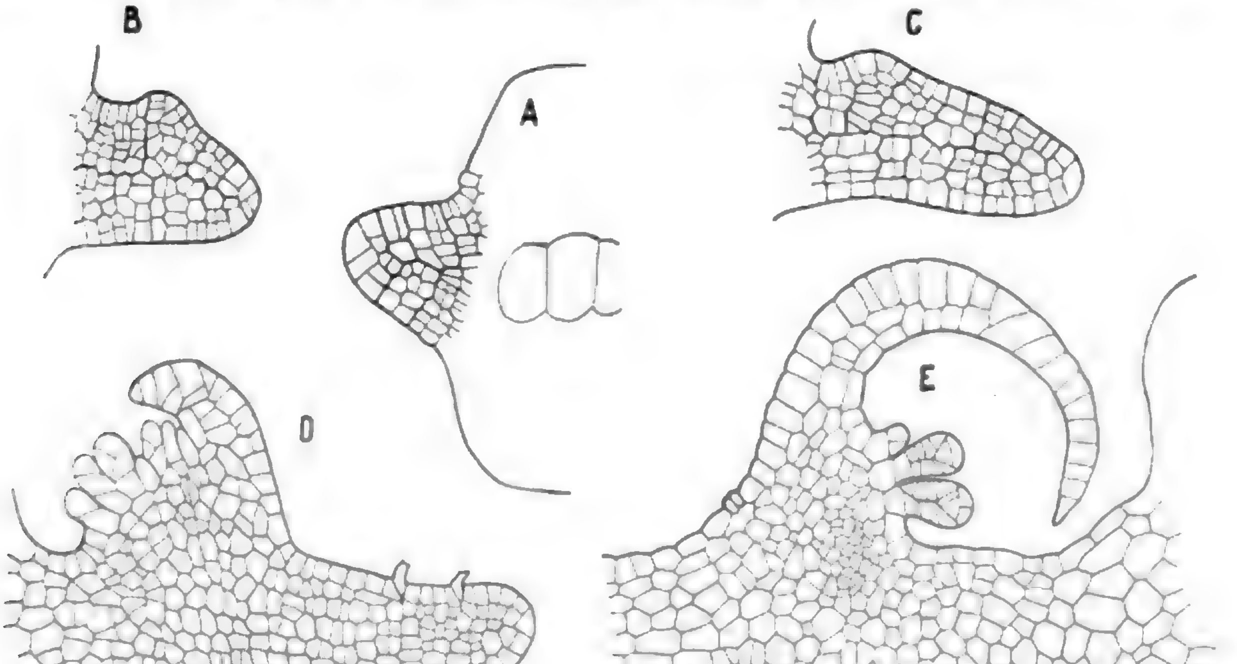


Fig. 58. Blechnum brasiliense. Schnitte durch Fiedern zum Vergleich mit Fig. 57. A junges, fertiles Fiederchen mit marginaler Teilung. B und C zeigen die Anfänge des „Indusiums" als eines Gebildes von offensichtlich superfizialer Herkunft. D und E ältere Stadien. Das Indusium bedeckt die jungen Sporangien, die in basipetaler Reihenfolge angeordnet sind. Das „Indusium" stellt phyletisch den Blattrand dar.

Digitized by Google

hervorgerufen wird (bei × oder in Fig. 57, A, B und C). Bei anderen Species, z. B. Blechnum brasiliense entsteht an derselben Stelle ein flügelartiger Auswuchs. Der Blattrand geht direkt in diesen über, sodaß der Sorus mit seinem Indusium später als superfiziales Wachstumsgebilde erscheint. Die Vergleichung der Spezies untereinander ergibt, daß der Flügel des Blattes von Blechnum brasiliense, der zu einer ausgedehnten Fläche auswächst, in korrelativer Beziehung steht zu dem kleineren Flügel des Blattes von Blechnum discolor, und daß das Indusium von Blechnum brasiliense phylogenetisch aus dem Blattrand hervorgegangen ist, jedoch in seiner Entwickelung behindert wurde durch das starke Wachstum des neuen Gebildes (Fig. 58). Biologisch ist der Fall wohl so zu deuten: die korrelative Reduktion der assimilierenden Fläche des fertilen Blattes war außerordentlich stark; der Blattrand wurde schon zum Schutze der Sori gebraucht; so wurde denn durch die Neubildung wieder eine assimilierende Fläche hergestellt. Das Endresultat ist aus Figur 59 ersichtlich.

Nicht nur im Sorus zeigt Blechnum Fortschritte gegenüber Plagiogyria. Ein solcher ist auch zu erkennen in den flachen Ramenta des Blattes und der Achse, sowie in der weitergehenden Aufteilung der Gefäßstränge in Achse und Blatt.

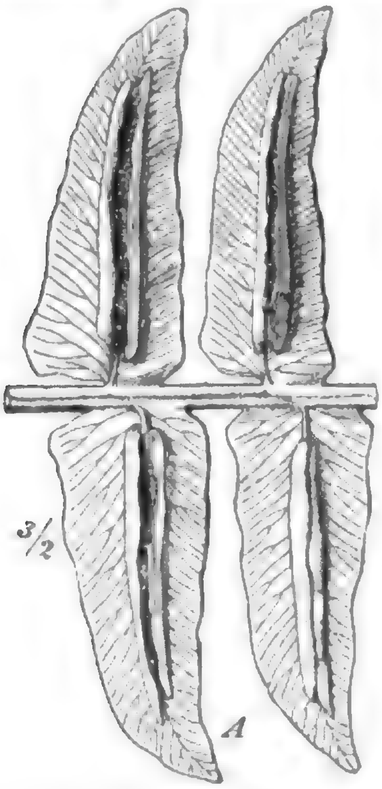


Fig. 59. Blechnum occidentale L. 2 Paar reifer Fiedern, von unten, die großen marginalen Wachstumsgebilde und die Indusien als Klappen dicht an der Mittelrippe und parallel zu dieser zeigend. Nach Diels.

13c) Sadleria-Woodwardia-Doodya. Diese Genera stehen hinsichtlich der Entwickelung der Sori noch eine Stufe höher als Eu-Blechnum. Die kontinuierlichen Indusiallappen auf jeder Seite der Mittelrippe sind hier zerlegt in eine Reihe kurzer Indusien, deren jedes ein Fleckchen des Sorus bedeckt. Das sieht dann aus, als ob eine Reihe von Sori auf jeder Seite der Mittelrippe stünde. Auf den ersten Blick scheint die Anordnung gleich der bei den Aspidieae zu sein. Die Phylogenie ist aber gänzlich verschieden; denn hier ist das Indusium ein Teil des Blattrandes, bei den Aspidieae dagegen ist es ein spezialisiertes Ramentum. Außerdem schaut hier das Indusium nach einwärts gegen die Mittelrippe, bei den Aspidieae aber nach außen gegen den Rand.

Bei einigen Species von Doodya ist die Reihe der Sori doppelt. Woodwardia und Doodya haben Netzaderung, ein Merkmal, das weiterhin sie als abgeleitete, relativ junge Formen kennzeichnet. Die ganze Reihe, von Plagiogyria aufwärts bis zu Woodwardia und Doodya, erscheint als eine sehr natürliche und zusammenhängende; die einzelnen Schritte der Fortentwickelung lassen sich bei der Vergleichung der lebenden Formen klar und deutlich erkennen. Problematisch bleibt, welches der phyletische Ursprung von Plagiogyria gewesen sein mag, und auch, ob es noch andere Abkömmlinge dieser Reihe gibt außer den genannten.

14. Asplenieae. Nach der Einteilung von Christ umfassen die Aspleniaceae die Blechneae und die Asplenieae. Eine ähnliche Anordnung hat Diels angenommen. Das setzt eine enge Verwandtschaft zwischen den beiden Gruppen voraus, für die sich zweifellos viel sagen läßt. Da jedoch die vergleichende Untersuchung noch nicht soweit in Einzelheiten eingedrungen ist, um eine phyletische Einheit erkennen zu lassen, so ist es wohl gegenwärtig das beste, die Asplenieae als eine besondere Reihe abzutrennen. Dazu gehören etwa 750 Farnspecies, die weit verbreitet sind in beiden Tropen und gemäßigten Zonen. Die wichtigsten Genera sind Athyrium, Diplazium und Asplenium. Sie bilden eine sehr natürliche Gruppe, charakterisiert durch den gemischten Sorus mit einem flachen Receptakulum, das seitlich von einer Ader entspringt, der es gewöhnlich ein Stück weit folgt. Das Indusium ist vom Rande des Blattes schief nach innen gerichtet. Darin stimmen die Asplenieae mit den Blechneae überein; das war wahrscheinlich der Grund dafür, daß die beiden Reihen zu einer zusammengezogen wurden (Fig. 60). Die Asplenieae sind hoch entwickelte Farne, das zeigt sich in dem gemischten Sorus, den dünngestielten Sporangien, dem dictyostelen Bau der Achse und in dem Vorhandensein von oft zahllosen Ramenta. Der Blattstiel hat jedoch in der Regel nur 2 Gefäßstränge, ein Merkmal, das nur auf eine Mittelstellung dieser Farne hindeutet. Das Indusium ist zuweilen ähnlich dem der Aspidieae. Die systematische Stellung

Digitized by Google

jedoch, die gewöhnlich den Asplenieae zugewiesen wird, weist eher auf eine Vergleichung mit dem Indusium der Blechneae hin. Wir haben gesehen, daß wahrscheinlich diese beiden Typen phyletisch verschieden sind, und daß ihre Indusien verschiedenartiger Herkunft sind. Es ist zurzeit unmöglich, das Indusium der Asplenieae mit Sicherheit auf das eine oder das andere zurückzuführen; ihre systematische Stellung bleibt also zweifelhaft.

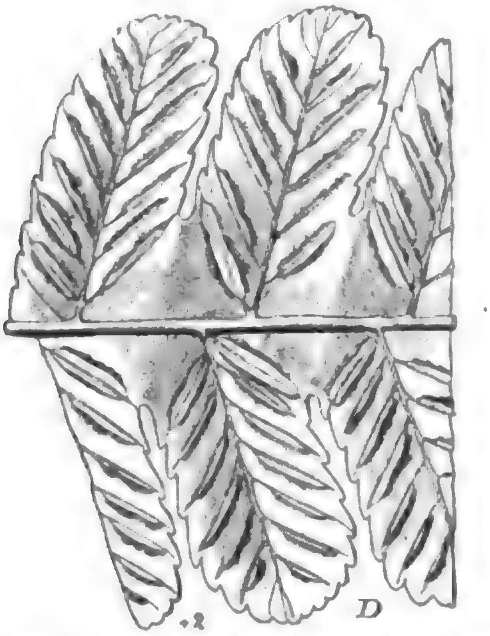


Fig. 60. Diplazium (Asplenium) radicans (Schk.) Presl. Teil eines Fiederblättchens 2. Ordnung mit Aderung und Sori. Nach Diels.

15. Pterideae. Die Pterideae stellen eine große und erfolgreiche Farnfamilie dar. Dazu gehört eine große Anzahl von Genera mit zusammen über 800 Arten. Diese sind charakterisiert durch die superfizialen Sori, die oft verlängert sind und auf den Adern oder an deren Enden sitzen. Die Adern zeigen oft Anastomosen, die parallel dem Blattrand verlaufen; die Sori können so zu einer kontinuierlichen intramarginalen Linie vereinigt sein. Das ist jedoch ein sekundäres Ergebnis. Der Blattrand ist gewöhnlich nach unten umgebogen und bildet eine indusiumartige Bedeckung (Fig. 61). Mit wenig Ausnahmen fehlen Indusien irgendwelcher anderen Art.

Die Pflanzen dieser Reihe haben sehr verschiedene Gestalt. Es gibt kriechende, büschelige und aufrechte Formen. Die Blätter zeigen relativ einfache bis reiche Verzweigung. Manchmal finden sich Haare, häufiger dagegen Ramenta. Das Gefäßsystem kann solenostel sein mit ungeteilter Blattspur, oder aber es ist eine Dictyostele mit geteilter Blattspur. Wenn also auch die Sori immer mehr oder weniger deutlich gemischt sind, die Sporenzahl relativ nieder

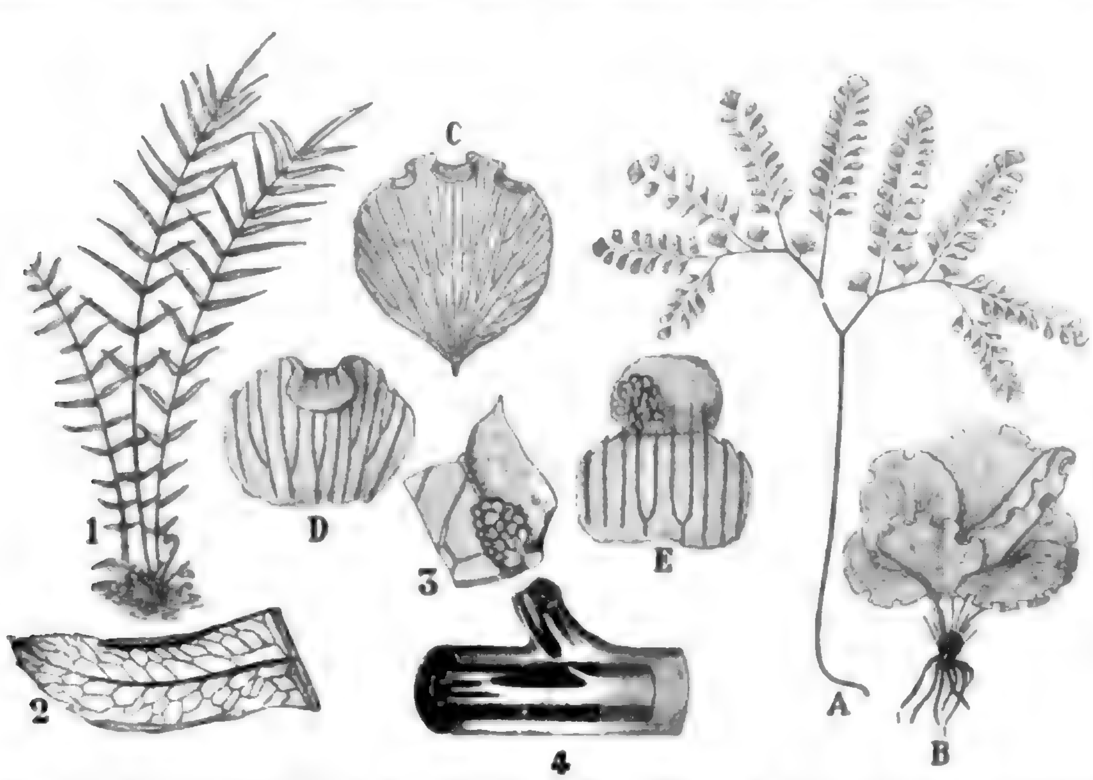


Fig. 61. I. 1 Pteris longifolia L. Habitus. Nach Diels. 2 und 3 Pteris aculeata, Sw. 2 Fieder. 3 Teil einer Fieder. Mit Sorus und aufgeklapptem Indusium. Nach Baker. 4 Pteris elata var. Karsteniana. Diagramm des Gefäßbündelverlaufes an der Insertionsstelle eines Blattes. Nach Gwynne-Vaughan. An der Vorderseite ein Stück herausgeschnitten, um das Innere zu zeigen. II. A Adiantum pedatum L. Blatt. Nach Diels. B Adiantum Parishii Hook. Habitus. Nach Hooker. C Unterseite eines Blattes. Nach Hooker. D und E Adiantum Capillus Veneris L. Teile einer fertilen Fieder. Bei E der fertile Lappen aufgeklappt, um die Sporangien zu zeigen. Nach Diels.

Digitized by Google

ist, so lassen sich doch augenscheinlich innerhalb der großen Reihe wieder kleinere phyletische Folgen erkennen.

Die Pterideae sind eine weitverbreitete Farngruppe, die etwa 30 Genera umfaßt, die über die tropischen und gemäßigten Regionen verteilt sind. Sie stellen offenbar eher eine phyletische Schar, als eine einzige beschränkte Linie dar. Einige von ihnen zeigen verhältnismäßig primitive Merkmale. Diese stammen wahrscheinlich direkt von Typen aus der Gruppe der Simplices ab und sind nicht etwa das Ergebnis irgendwelcher sekundärer Modifikationen aus anderen Reihen spezialisierter Leptosporangiaten. Man hat sie in 4 Unterreihen eingeteilt: die Gymnogramminae, die Cheilanthinae, die Adiantinae und die Pteridinae, welche natürliche Unterschiede zeigen; doch sind sie wohl sozusagen als ein Bündel phyletischer Linien von einem gemeinsamen Ursprung ausgegangen.

Das bekannteste Beispiel aus der Gruppe der Pterideae ist Pteridium aquilinum, der gemeine Adlerfarn, ein kosmopolitischer Farn, der zu den weitest verbreiteten Pflanzen gehört. Seine Stellung in der Familie ist eine relativ fortgeschrittene.

15a) Gymnogramminae. Diese sind charakterisiert durch die Sori, die sich der ganzen Aderung, oder doch wenigstens des größten Teils derselben, entlang erstrecken, wie z. B. bei Gymnopteris rufa (L.) Link. (Fig. 62). Häufig fehlt ein besonderer Schutz

Fig. 62. Gymnopteris rufa (L.) Bernh. Fieder und Fiederausschnitt. Beide vergrößert. Nach Flora Brasiliensis.

der Sori; die Pflanzen sind gewöhnlich mit Haaren an Stelle der Schuppen bedeckt, die Blattspur ist ungeteilt. Diese Merkmale deuten auf die verhältnismäßig primitive Stellung dieser Farne hin. Andererseits ist netzförmige Aderung nicht selten, besonders bei dem Genus Hemionitis, wenn auch viele Formen der Gruppe offene Gabelung der Blattadern aufweisen. 10 Genera gehören hierher.

15b) Cheilanthinae. Die Sori dieser Farne sind beschränkt auf die marginale Region der Adern; der Blattrand ist nach unten umgebogen und bildet so in vielen Fällen einen Schutz der Sori. Von den Genera, die Diels zu der Gruppe zählt, seien zunächst die primitiveren genannt, nämlich: Plagiogyria, Llavea und Cryptogramme. Plagiogyria haben wir schon im Zusammenhang mit der Blechnum-Woodwardia-Reihe besprochen. Es ist sehr wohl möglich, daß es gegenüber gewissen Cheilanthinae, wie Llavea und Cryptogramme, die Stellung eines synthetischen Typus einnimmt. Diese Ansicht findet eine Stütze in der Tatsache, daß bei Cryptogramme der Annulus gelegentlich eine Spur schief sein kann. Wie dem auch sein mag, so sind doch offenbar Llavea und Cryptogramme relativ primitive Typen der Familie. Von den übrigen Genera sind besonders hervorzuheben die Xerophyten Notholaena und Cheilanthes; sie sind mit schuppigen oder wachsartigen Gebilden bedeckt, ihre Blattstiele sind schwarz. W. Hooker schon hat den Habitus von Cheilanthes verglichen mit dem von Mohria, und es ist wohl möglich, daß ein gewisser phyletischer Zusammenhang der Familie mit den Schizaeaceae bestanden hat. Ein anderes wichtiges Genus ist Pellaea; denn es kann als ein Prototyp der noch übrig bleibenden 2 Abteilungen der Familie betrachtet werden. Seine Sori sitzen meist nahe am Rand, auf den gegabelten, völlig getrennten Adern (Fig. 63). Der Blattrand ist umgeschlagen und bedeckt so die Reihe der Sori. Die Pflanze ist mit Haaren bedeckt, die Blattspur ungeteilt, der Stamm solenostel oder schwach dictyostel, alles Anzeichen eines relativ primitiven Zustandes. Wahrscheinlich umfassen die Cheilanthinae die ältesten Formen der lebenden Pterideae.

15c) Adiantinae. Dazu gehört nur das große Genus Adiantum, weit verbreitet in den Tropen, aber mit einigen Arten auch in den gemäßigten Zonen vertreten. Sie sind charakterisiert durch die weitgehende Zerteilung der Blätter (vgl. Fig. 61A). Die Teilblättchen tragen am distalen Rande einen oder mehrere Sori; sie haben, wie die von Pellaea, getrennte Gabeladern. Die Adern erstrecken sich bis in kleine Randläppchen hinein, die umgeschlagen sind; letztere tragen die Sporangien. Wir haben hier einfach einen weiter spezialisierten Pellaea-Sorus (vgl. Fig. 61C, D und E).

Digitized by Google

Diese Annahme wird noch gestützt durch die Anatomie und die Haarbedeckung in der Jugend.

15d) Pteridinae. Die Pteridinae umfassen 9 Genera, die in ihrer Fruktifikation gegenüber Pellaea einen Fortschritt zeigen. Derselbe besteht in dem Auftreten einer intramarginalen Kommissur, welche die Enden der Adern verbindet. Auf dieser Kommissur sitzen die Sporangien; sie sind bedeckt von

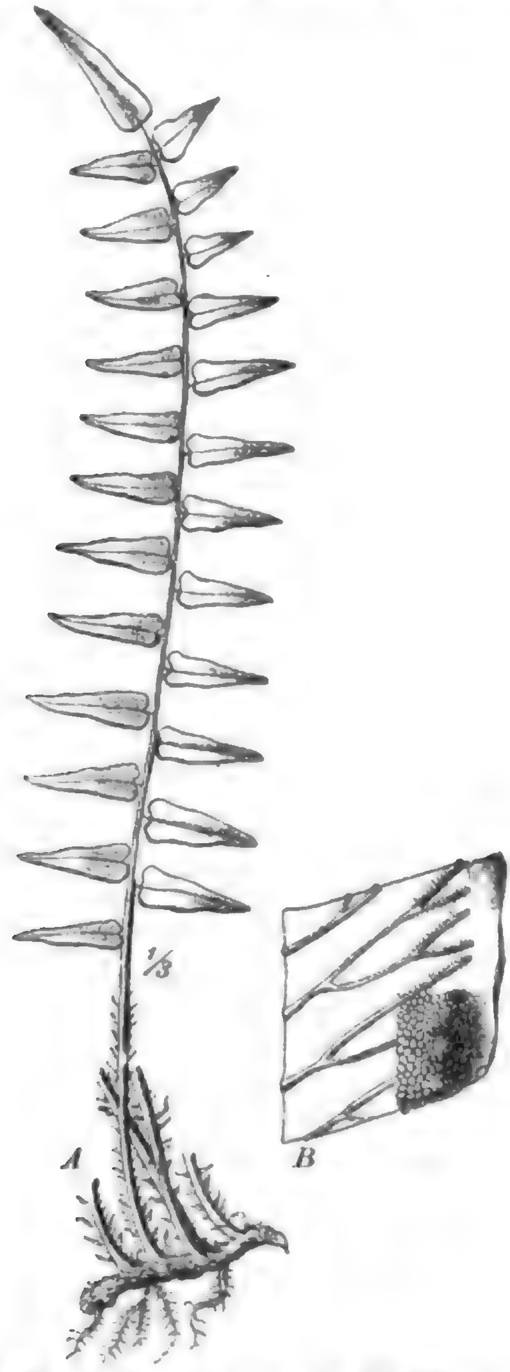


Fig. 63. Pellaea falcata (R. Br.) Fée. A Habitus. B Teil einer Fieder, mit Aderung und Sori. A nach Diels. B nach Hooker.

dem nach unten umgebogenen Rande. Das ist sicher ein Fortschritt gegenüber Pellaea; vaskulare Verschmelzungen deuten ja selbst schon ein abgeleitetes Stadium an (vgl. Fig. 61, 1 bis 3).

Die Hauptgenera sind Pteris und Lonchitis, Paesia und Pteridium. Pteris ist ein großes Genus, das überall in den wärmeren Teilen der Welt vorkommt. Es sind kriechende und aufrechte Formen mit Blättern, die sehr verschieden stark verzweigt sind. Die kriechenden Formen sind solenostel, ihre Blattspur ist ungeteilt. In einigen Fällen ist ein markständiges System entwickelt, so daß schließlich Polyzyklie resultiert, z. B. bei Pteris elata (Fig. 61, 4). Der Sorus ist wie oben beschrieben (Fig. 61, 3). Seinen Merkmalen nach nimmt Pteris eine mittlere Stellung ein; es ist gegenüber Pellaea deutlich fortgeschritten, jedoch nicht so stark wie Paesia und Pteridium.

Pteridium, der Adlerfarn, zeigt Fortentwickelung sowohl im Gewebe der Gefäßbündel als im Sorus. Die Blattspur ist in eine Anzahl von Strängen geteilt; ein Querschnitt des Rhizoms zeigt eine Teilung der beiden konzentrischen Gefäßstränge in zahlreiche Meristelen (Fig. 64). Was den

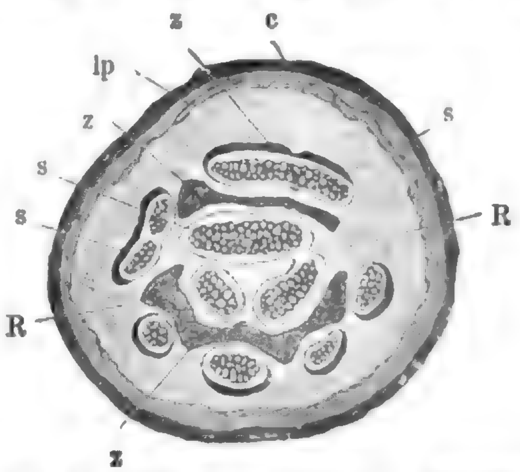


Fig. 64. Pteridium aquilinum. Querschnitt durch das Rhizom. s konzentrische Meristelen, z sklerenchymatische Platten, lp Zone der Sklerenchymfasern, R Rinde, e Epidermis. Vergrößerung 7fach. Nach Strasburger.

Sorus betrifft, so findet sich bei Pteridium und auch bei Paesia, außer dem Schutze durch den umgeschlagenen Blattrand, noch ein inneres Indusium, das vermutlich durch seitliche Verschmelzung von Haaren entsteht; ein solches Indusium kommt bei keinem anderen Genus vor. Welches die Natur dieses Indusiums auch wirklich sein mag, sein Vorhandensein bedeutet jedenfalls einen Fortschritt gegenüber den anderen Formen der Familie. Pteridium ist also ein geförderter und vielleicht der fortgeschrittenste Typus der Pteridinae.

Die Pterideae zeigen also, neben gewissen, relativ primitiven Formen, ganz bestimmte Linien de Fortentwickelung, die in gewissem Maße parallel laufen mit solchen, wie wir sie anderwärts sehen können. Aus ihnen sind wohl keine höheren Typen als sie selbst hervorgegangen; sie stellen

Digitized by Google

offenbar eine Reihe dar, die frühzeitig von anderen sich abtrennte. Es bleibt noch viel zu tun übrig, bis die Tatsachen genügen, um sie mit einiger Sicherheit entsprechend ihren phyletischen Beziehungen „inter se" einzureihen.

Im vorstehenden ist der Versuch gemacht worden, die Hauptreihen der Filicales darzulegen und ihre phyletischen Verwandtschaften anzugeben. Kleinere Reihen sind weggelassen worden. In mehreren verschiedenen Reihen sind ähnliche Methoden der fortschreitenden Entwickelung erläutert worden; in der Tat war parallele Entwickelung mit folgender Konvergenz der Typen häufig. Das ist besonders deutlich zu sehen bei der Entstehung derjenigen Formen, die als „Polypodium" und „Acrostichum" bezeichnet worden sind. Das frühere Genus Polypodium wurde charakterisiert durch die superfizialen Sori von rundem Umriß, ungeschützt durch irgendwelche indusiale Bedeckung. Doch dieser Zustand kann aus sehr verschiedenen Anfängen hervorgegangen sein. Technisch ist Lophosoria ein Polypodium, und es wurde als solches von Schkuhr beschrieben; doch es ist ein primitiver Typus, der niemals ein Indusium besessen hatte. Andererseits hat eine Abteilung von Dryopteris den Polypodioidzustand erlangt infolge der Verkümmerung des Indusiums. Ferner hatte man unter „Acrostichum" zu verstehen Farne, deren Sporangien, ungeschützt durch ein Indusium, über eine große Fläche des Blattes ausgestreut waren. So wurde Platycerium dazu gerechnet, das jedoch wahrscheinlich durch Dipteris conjugata ein Matonioidabkömmling ist. Ebenso wurden dazu früher die Farne der Gruppe Stenochlaena gestellt, obwohl diese sicher von den Blechneae abzuleiten sind. Die Sache ist eben die, daß Polypodium und Acrostichum, im alten unbeschränkten Sinne keine natürlichen Genera sind, sondern Stadien oder Zustände darstellen, die durch Modifikation aus mehreren unterschiedenen Anfängen hervorgegangen sein können.

Beim Studium einer so großen und wohlbeschriebenen Familie wie dieser ist es zuerst nötig, die relativ konstanten Merkmale von den weniger konstanten zu trennen. Die Lage der Sori in Beziehung zum Blattrand hat sich als eines der konstantesten Merkmale durch lange Reihen hindurch erwiesen, wogegen andere, wie die Verzweigung, die epidermalen Anhangsgebilde, das Gefäßsystem, der Bau des Sorus, die Größe und Sporenzahl der Sporangien und korrelativ die Größe der Antheridien und die Zahl der Spermatocyten, alle variiert haben. Bei der Betrachtung dieser Stammesreihen ergeben sich Resultate, die mit Hilfe des fossilen Materials kontrolliert werden müssen. Ergibt sich hierbei Uebereinstimmung, so ist das ein Zeichen dafür, daß die angewendete Methode gesund und richtig war. Demnach stellen die Filicales ein Bündel von Stammesreihen dar, die, nach dem heutigen Stande unserer Kenntnisse, sich nicht auf einen einzigen Ausgangspunkt zurückführen lassen. Die primitiven Formen zeigen vorwiegend Dichotomie, eine relativ massige Organisation, wie schon ihre Meristeme, Haarbedeckung, protostelen Bau der Achse, ungeteilte Blattspur, Sori mit simultaner Entstehung der wenigen und großen, ungeschützten Sporangien und große Sporenzahl im Sporangium. Ihr Gametophyt war wahrscheinlich massig, mit relativ großen Antheridien und in das Gewebe eingesenkten Archegonien. Die jüngeren abgeleiteten Formen zeigen in verschieden hohem Grade: Verlust der dichotomen Verzweigung, zartere Organisation, Schuppen an Stelle der Haare, verschieden weitgehende Vervollkommnung der Stele und Blattspur, u. a. die Aufteilung in kleinere Stränge, Sori verschiedenartig geschützt, mit sukzessiver Bildung der zahlreichen, relativ kleinen Sporangien, und kleiner Sporenzahl in jedem derselben. Ihr Gametophyt ist zarter, die Sexualorgane ragen hervor, die Zahl der Spermatocyten ist reduziert. Dieser Zustand ist durch Progression längs paralleler Linien erreicht worden. Die so entstehenden leptosporangiaten Farne sind vorherrschend unter den Farnen der Gegenwart. Sie stellen offenbar die höchste Fülle der Entwickelung dar, die bisher von den Filicales erreicht wurde.

2. Equisetales.

Die Lebensgeschichte der Equisetales zeigt dieselben Wesenszüge wie die der Filicales. Die unterscheidenden Merkmale liegen in der Beschaffenheit des Sporophyten, der deutlich microphyll ist, wie wir es an dem lebenden Genus Equisetum (Schachtelhalme) sehen können. Sie sind gegenüber allen anderen Pteridophyten gekennzeichnet durch die Anordnung der Sporangien; diese werden von Sporangiophoren getragen, welche direkt der Achse ansitzen, und die nicht bestimmt mit Blättern in Zusammenhang gebracht werden können. Die Sporangiophoren haben einen von Gefäßbündeln durchzogenen Stiel; am distalen Ende sind sie schildförmig verbreitert und hier sitzen die Sporangien (Fig. 65, B, C).

Das Phylum wird heute nur noch durch das Genus Equisetum vertreten, mit ungefähr 30 Species, welche weit verbreitet sind und feuchte Standorte bevorzugen. Jedoch es ist erwiesen, daß die Equisetales schon im

Digitized by Google

Devon vorkamen, wo sie schon einen hohen Grad der Ausbildung erreicht hatten. Charakteristischer noch sind sie für das Karbon, in welchem sie zur höchsten Entwickelung gelangten, sowohl der Zahl als auch der Größe nach; sie wuchsen dort zu hohen Bäumen heran. In der Folge traten sie dann mehr und mehr zurück, und heute sind sie nur noch repräsentiert durch das kosmopolitische Genus Equisetum, das eine bemerkenswerte Gleichförmigkeit der Typen zeigt. Die wesentlichen Merkmale des lebenden Genus sollen zuerst besprochen werden, daran anschließen soll dann die vergleichende Betrachtung der Fossilien auf Grund dessen, was bei Equisetum zu sehen ist.

Am Sproß tritt am stärksten hervor die Achse, die immer radiär gebaut ist und an ihrem Scheitel eine deutliche Initiale aufweist. An der vegetativen Achse entspringen seitlich in dichter acropetaler Reihenfolge die Blattscheiden. Diese verwachsen schon frühzeitig miteinander, und im fertigen Stadium sieht man dann von den verwachsenen Blattscheiden nach oben hin abstehen die Blattzipfel (Fig. 65 A) in Form von kleinen Zähnen. Die Internodien strecken sich; sie zeigen eine Kanellierung und zwar so, daß die Riefen oder Rinnen aufeinanderfolgender Internodien alternieren, was man an den Knoten leicht erkennen kann. Dieser Bauplan des Sprosses ist für alle lebenden Schachtelhalme derselbe. Unterschiede finden sich in der Länge der Internodien, der Zahl der Rillen, in dem Vorhandensein oder Fehlen des Chlorophylls je nach der Entstehung über oder unter der Erde. Immer aber ist beibehalten die radiäre Symmetrie und die quirlförmige Anordnung der Blätter.

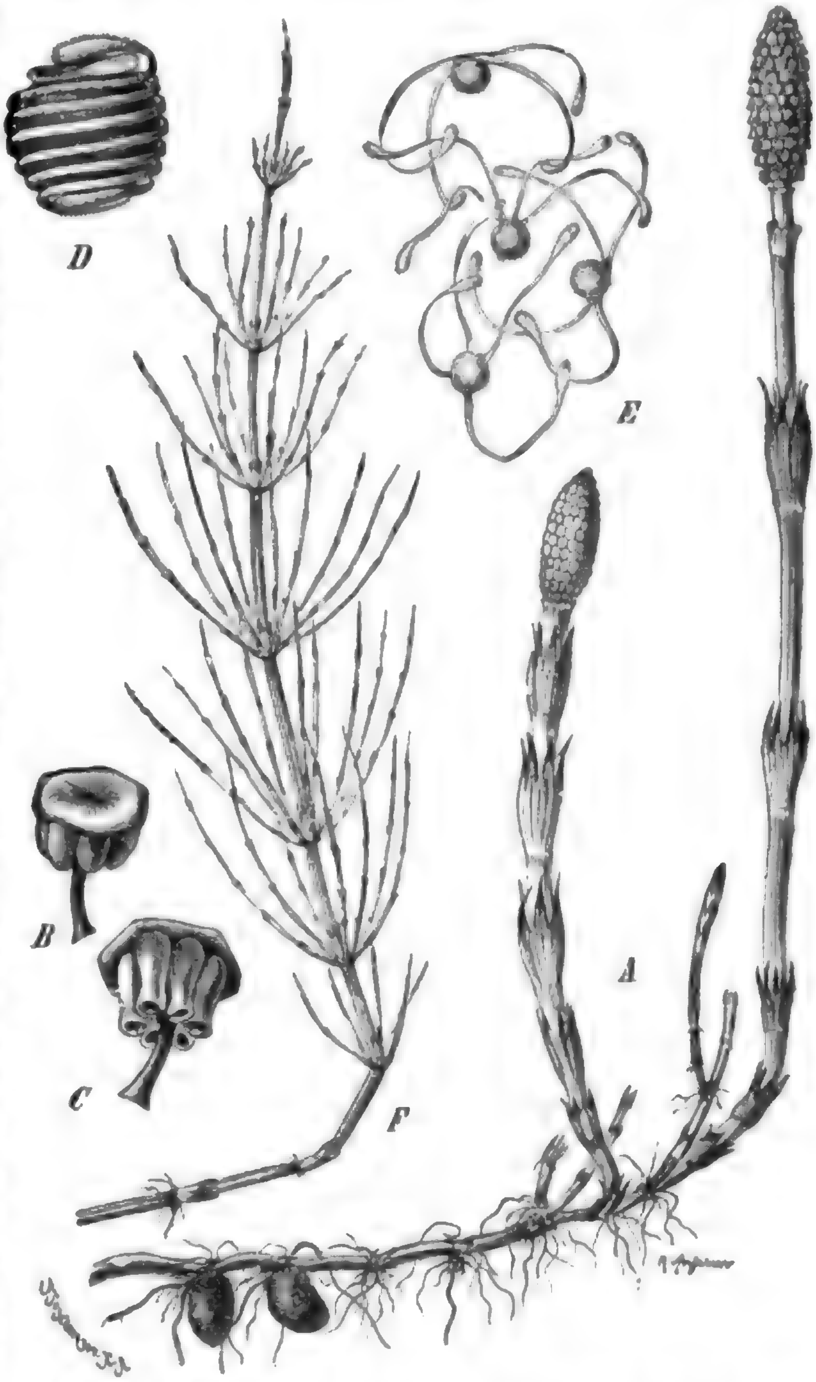


Fig. 65. Equisetum arvense. A fertiler Sproß, vom Rhizom entspringend, das auch Knollen trägt; die vegetativen Sprosse noch nicht entfaltet. F steriler, vegetativer Sproß. B und C Sporangiophoren mit Sporangien, die in C geöffnet sind. D Spore mit den beiden Spiralbändern des Periniums. E trockene Sporen, die Spiralbänder ausgebreitet. A und F ½ natürliche Größe, V, C, D, E vergrößert. Nach Strasburger.

Die Verzweigung des Sprosses ist monopodial; sie geht von Zellen aus, die unmittelbar über den Blattscheiden liegen und mit deren Zähnen alternierend stehen. Ein so entstehender Zweig durchbricht die umhüllende Blattscheide, sodaß der Anschein endogener Entstehung erweckt wird. Die Seitensprosse sind genau so gebaut wie der Hauptsproß, doch gewöhnlich in vereinfachtem Maße. An diesen Seitenknospen werden immer Wurzeln gebildet, je eine an der Basis einer jeden; sie werden entwickelt, auch wenn die Knospen schlafend bleiben (Fig. 65, A). Sproß und Wurzeln zeigen je nach den Umständen verschiedene Grade der Entwickelung; daraus ergeben sich deutliche äußere Verschiedenheiten, auf

Digitized by Google

denen die spezifische Unterscheidung beruht.

Die Sporangiophoren sind zu Strobili oder Zapfen vereinigt, die normalerweise terminal an der Achse stehen und oft nur an der Hauptachse gebildet werden (Fig. 65, A). In vielen Fällen werden sie aber auch an Seitenzweigen entwickelt. Man kann ganz allgemein sagen, daß die Strobili nicht auf Sproßachsen einer bestimmten Ordnung beschränkt sind. So bedarf es keiner großen Einbildungskraft, um in dem Sproßsystem von Equisetum das Resultat einer Vervielfachung einer einfachen Einheit zu sehen; diese Einheit ist der Sproß, der aus Achse und Blattscheiden besteht und in einem terminalen Strobilus Sporen bildet.

Der Strobilus besteht aus einem Stück der Achse, an welchem die Sporangiophoren sitzen, oft nicht so regelmäßig wie die Blattscheiden. Zwischen den einzelnen Sporangiophoren finden sich keine Blätter. Ein Sporangiophor hat einen zentralen Stiel, der an seinem distalen Ende eine Scheibe trägt; von dieser hängen Sporangien in kleiner, aber wechselnder Zahl herab (Fig. 65, B, C). Die Sporen sind alle gleich (isospor). Sie haben außer den zwei üblichen Häuten noch ein Epispor, das bei der Reife sich in vier Bänder teilt, die an einem zentralen Punkt festgeheftet sind. Diese Bänder krümmen sich hygroskopisch, so daß die Sporen sich aneinanderhaken; infolgedessen wachsen die eingeschlechtigen Prothallien immer in Gruppen vereinigt (Fig. 65, D, E).

Der Typus von Equisetum läßt sich bis ins mittlere Karbon (Middle Coal Measures) zurückverfolgen, häufiger jedoch findet er sich in den Gesteinen des Mesozoikums. Verwandt mit ihm ist die fossile Form Phyllotheca aus dem Perm, die sich hauptsächlich dadurch unterscheidet, daß zwischen den Sporangiophoren des Strobilus Scheiden steriler Blätter stehen; ferner auch Schizoneura aus der Trias, das charakterisiert ist durch seine quirlförmig angeordneten Blätter, die zu Scheiden verwachsen sind, welche längs aufreißen, so daß die entstehenden Lappen gerade wie einzelne Blätter von der Achse abstehen. Die meisten der älteren Equisetenfossilien jedoch gehören zu dem Typus der Calamarien. Das waren Pflanzen von baumförmigem Habitus, mit sekundärem Dickenwachstum des Stammes, jedoch mit dem gleichen primären Bau des Sprosses wie Equisetum. Die Blattquirle verwachsen häufig an der Basis, jedoch oft nur wenig, wie bei Annularia; bei Asterophyllites aus dem Devon dagegen stehen die Blätter vollständig getrennt in weit divergierenden Quirlen. Die Blätter waren gewöhnlich einfach, wie die von Equisetum, aber größer und als Assimilationsorgane wirksamer. Bei den ältesten Formen, wie Asterocalamites aus dem Kulm, waren die Blätter wiederholt dichotom verzweigt (Fig. 66). Die sehr alte

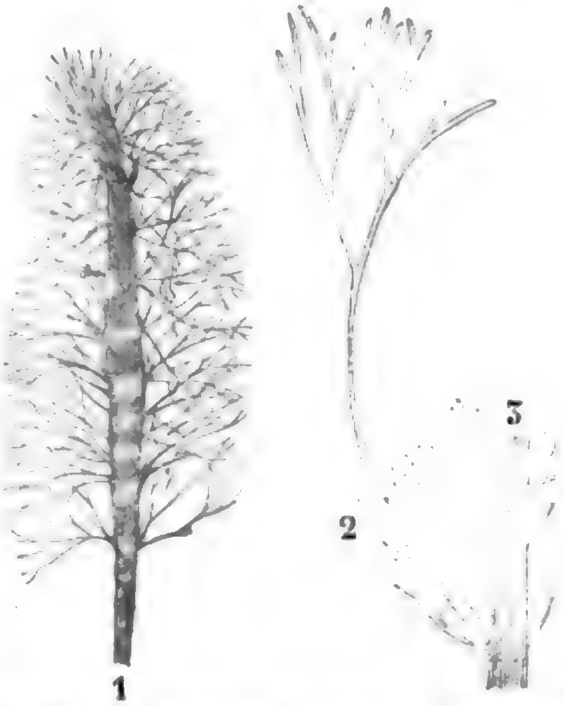


Fig. 66. 1 Archaeocalamites. 2 ein Blatt desselben. 3 Asterocalamites scrobiculatus. Nach Stur.

Form Pseudobornia hatte gegabelte, fächerförmig ausgebreitete Blätter von beträchtlichen Dimensionen. Die älteren Formen unterscheiden sich von den jüngeren auch darin, daß bei ihnen die Glieder aufeinanderfolgender Quirle superponiert sind, nicht alternieren. Der primitive Equisetoidtypus hatte demnach relativ große, im Quirl stehende, superponierte Blätter; diese waren voneinander getrennt und zeigten Gabelung. Der Zustand des heutigen Equisetum wurde erreicht durch Reduktion der verwachsenen und einfachen Blätter, die nun alternierend, nicht superponiert, stehen; die assimilatorische Funktion ging auf die Gewebe der Achse über. Wir haben jedoch keinen tatsächlichen Beweis dafür, daß die Entwickelung von Equisetum in Wirklichkeit so vor sich gegangen sei.

Der Strobilus der Calamarien stand terminal an der Achse; er war gewöhnlich länger als der von Equisetum und unterschied sich von diesem auch im Bau. Der Equisetum am nächsten stehende Typus ist das alte Archaeocalamites; bei den anderen Calamariaceen jedoch alternieren regelmäßig ein Wirtel von sterilen Blättchen und ein solcher von Sporangiophoren (Fig. 67, 1, 3). Die Sporangiophoren waren im wesentlichen wie die von Equisetum; ihre Beziehung zu den sterilen Blattwirteln war eigentümlich. Es bestand kein strenges numerisches Verhältnis zwischen beiden; zudem standen die aufeinanderfolgenden sterilen Blattquirle in

Digitized by Google

Alternation, die Sporangiophorenquirle dagegen waren superponiert. Andererseits ist für Palaeostachya vera gezeigt worden. daß die Zahl der sterilen Blättchen annähernd übereinstimmt mit der Zahl der Sporangiophoren. Diese Tatsachen müssen in Betracht gezogen werden bei der Diskussion der Morphologie des Strobilus der

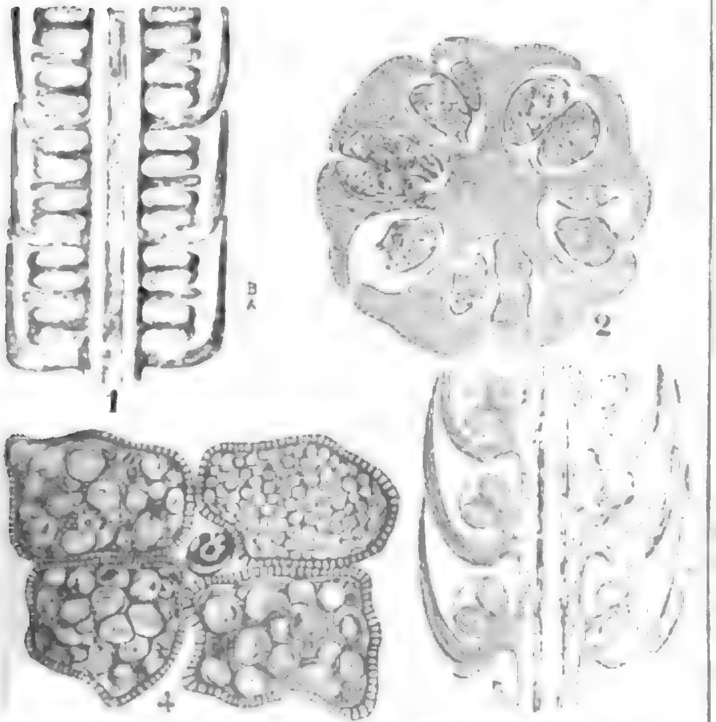


Fig. 67. Fruktifikationen von Calamiten. 1 Calamostachys Binneyana. Längsschnitt des Strobilus. 2 Querschnitt desselben in der Höhe eines Sporangiophorenwirtels. 4 Calamostachys Casheana. Querschnitt durch den Stiel eines Sporangiophors und dessen Sporangien mit 3 Makro- und einem Mikrosporangium. 5 Palaeostachya. Längsschnitt eines Strobilus, die axillare Stellung der Sporangiophoren zeigend. Nach Scott und Hickling.

Equisetales und bei der Entscheidung über den wahren Charakter der Sporangiophoren.

Figur 68 stellt einen Querschnitt durch ein Internodium von Equisetum arvense dar. Wir sehen die Epidermis, die Rinde und die zentrale Stele Wie immer bei im Wasser wachsenden Pflanzen finden sich große Lufträume: ein zentraler Luftgang und dann eine Reihe von Höhlen. je eine an jedem der in einem Ring angeordneten Gefäßbündel, die den vorspringenden Längsleisten (Carinae) an der Oberfläche des Sprosses gegenüberstehen und deshalb Carinalhöhlen genannt werden; mit ihnen alternierend und also den Kanälen an der Oberfläche gegenüberstehend. findet sich eine Reihe von Höhlen in der Rinde: sie heißen Vallecularhöhlen. Der periphere Teil der Rinde setzt sich teils aus mechanischem, teils aus grünem, assimilierendem Gewebe zusammen. Die Stele besteht aus dem Ring von Gefäßbündelsträngen, die rund um das zentrale Mark herumstehen. Diese sind seitlich voneinander getrennt durch breite Strahlen von Parenchym, das Ganze ist bei den meisten Species begrenzt von einer ununterbrochenen Endodermis. Die Ausbildung und Lage der Endodermis wechselt von Species zu Species; doch das sind wohl spezielle und sekundäre

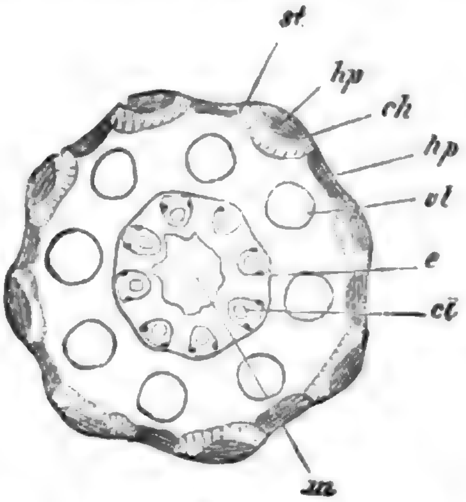


Fig. 68. Equisetum arvense. Querschnitt durch den Stengel. m lysigene Markhöhle, e Endodermis, cl Karinalhöhlen in den kollateralen Gefäßbündeln, vl Vallekularhöhlen, hp Sklerenchymstränge in den Riefen und Rippen, ch chlorophyllführendes Gewebe der primären Rinde, st Spaltöffnungsreihen. Vergrößerung 11 fach. Nach Strasburger.

Aenderungen, sie berühren nicht die Erkenntnis, daß der Stamm im wesentlichen monostel gebaut ist.

In den Internodien sind die Leitbündel ziemlich reduziert, wie gewöhnlich bei Wasserpflanzen. Zwei Gruppen von Protoxylem liegen rechts und links von der Carinalhöhle und zwei andere kleinere Gruppen von Xylem schief nach außen von ihr, dazwischen liegt Phloem. An den Knoten dagegen ist das Xylem besser entwickelt und es finden sich da sogar Zeichen kambialer Tätigkeit. Zur Erklärung dieser Struktur ist angenommen worden, daß der Stamm monostel sei, wie bei anderen primitiven Formen, daß er aber nur noch einen geringen Ueberrest des mutmaßlichen alten, protostelen Zustandes darstellt.

An Stelle des soliden Xylemkerns findet sich im zentralen Teil Parenchym; bei dem alten Fossil Calamites pettycurensis ist diese Umwandlung erst bis zu einer Volumverringerung des Xylems gediehen, es bleibt hier noch ein zentripetaler Ueberrest. Das deutet auf die Wahrscheinlichkeit der Annahme eines protostelen Ursprungs hin, vergleichbar mit dem, was bei den Lycopodiales und Sphenophyllales zu sehen ist. Physiologisch erscheinen diese Umwandlungen als das natürliche Ergebnis des Lebens im Wasser oder in schlammigem Grunde; mit den ana-

Digitized by Google

tomischen Veränderungen harmoniert auch die Reduktion, welche die Blätter erfahren. Es sind freilich auch andere Erklärungen dieses schwierigen anatomischen Problems versucht und gegeben worden.

Die jungen Zweige eines Calamiten zeigen eine Struktur, die identisch ist mit der eines modernen Equisetum. Später aber tritt in ihnen ein Kambium in Tätigkeit ähnlich dem, wie wir es in den Knoten der lebenden Equisetumspecies finden. In der Tat ist denn auch ein Calamit in anatomischer Hinsicht einfach ein Equisetum mit sekundärem Dickenwachstum. Durch das Dickenwachstum entstanden Stämme von erheblicher Größe und Dicke. In gleichem Maße nahm natürlich die Markhöhle an Größe zu. Vielleicht das häufigste Fossil aus der Kohle ist der geriefelte innere Abguß einer solchen Markhöhle, und es ist nicht immer ohne weiteres zu ersehen, ob man nur diesen oder den Stamm selbst vor sich hat.

Die Wurzeln von Equisetum stimmen im wesentlichen mit denen der Farne überein, sie zeigen natürlich kein sekundäres Dickenwachstum. Die von Calamites aber haben kambialen Zuwachs, entsprechend den Verhältnissen im Stamm.

An den Scheiteln des Stammes und der Wurzel von Equisetum sind regelmäßige Teilungen aus einer einzigen Initialen zu erkennen (Fig. 69). Die Scheitelzelle hat die Form einer dreiseitigen Pyramide, von deren Seitenflächen werden die Segmente (S′ S″) in regelmäßiger Folge abgeschnitten. Zwischen den apikalen Teilungen des Stammes und den Geweben desselben läßt sich keine exakte Verbindung herstellen. Das ergibt sich aus der Tatsache, daß die inneren Zellen, die durch die ersten periklinalen Teilungen jedes Segmentes entstehen, in der weiteren Entwickelung nur Mark erzeugen. Wir werden sehen, daß Equisetum eusporangiat ist. Es ist bemerkenswert, daß bei einem eusporangiaten Typus solche regelmäßigen apikalen Teilungen vorkommen. Etwas Aehnliches jedoch findet sich bei den Ophioglossaceae.

Wir gehen nun über zur Besprechung der Sporen erzeugenden Teile und wollen ihre Entwickelung und ihre morphologische Natur untersuchen. In den Anfangsstadien sind die Sporangiophoren nicht unähnlich den sterilen Blattscheiden; sie sind massiv und konvex und zeigen ein fächerförmiges Maßwerk, wie in Längsschnitten zu erkennen ist. Diese Aehnlichkeit ist als Argument angeführt worden für die Ansicht, daß die Sporangiophoren und die Deckblätter das Ergebnis einer Metamorphose aus im wesentlichen demselben Teil darstellen. Bald lassen sich nahe an den Rändern des konvexen Gebildes Zellen erkennen, aus welchen alle wesentlichen Teile des Sporangiums hervorgehen, doch wirken auch noch benachbarte Zellen bei der Bildung des sporangialen Gewebskörpers mit. Die Entstehung des Sporangiums ist also eusporangiat. Jede Elterzelle teilt sich periklin, so daß im Verlaufe weiterer Teilungen eine innere sporogene Masse abgegrenzt wird gegen die Sporangiumwand. Später trennen sich die

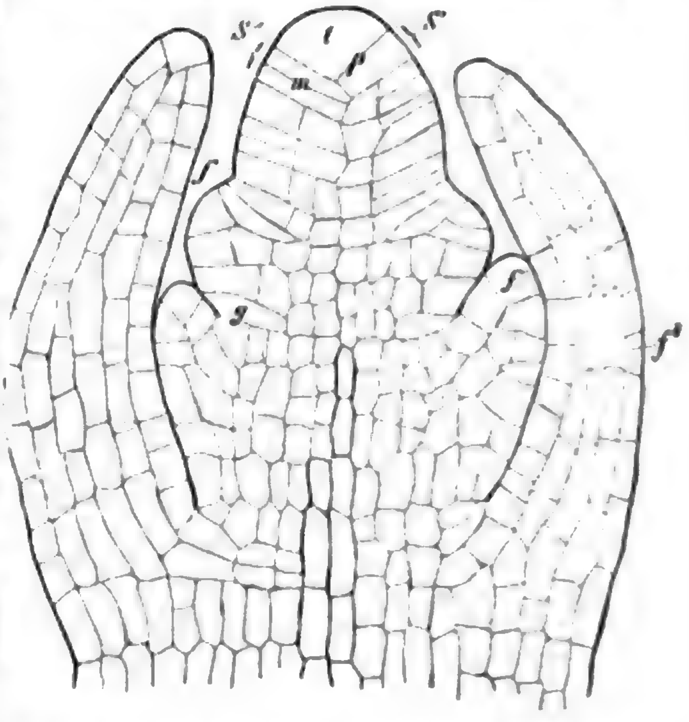


Fig. 69. Equisetum arvense. Medianer Längsschnitt des Vegetationskegels. Vergrößerung 240 fach.

Zellen des sporogenen Gewebes voneinander, sie runden sich ab und gehen die Tetradenteilung zur Bildung der Sporen ein. Mittlerweile hat sich die sie unmittelbar umgebende Zellschicht zu einem Tapetum oder zur Nährschicht entwickelt; die Zellen desselben verschmelzen und die so entstehende vielkernige Plasmamasse dringt zwischen die Sporenmutterzellen ein und ernährt sie bis zur Reife, dann wird sie absorbiert und die Sporen bleiben trocken zurück (Fig. 69a). Die oberflächlichen Zellen der Wand des Sporangiums werden hart und spiralig verdickt, während die inneren sich auflösen. Das reife Sporangium besteht so aus einer einschichtigen Wand und einer trockenen Sporenmasse darin. Die Sporen sind alle gleich. Das Sporangium springt an einer Längslinie auf, die nach innen gegen den Stiel zu gelegen ist; diese Linie ist in der Zellstruktur vorgebildet.

Infolge des stärkeren Wachstums des zentralen Teiles des Sporangiophors werden die Sporangien im Laufe der Entwickelung umgedreht und hängen dann von der verbreiterten, distalen Vorderseite herab (Fig. 65, A, B, C). Letztere stoßen in der Jugend dicht zusammen, so daß die Sporangien dadurch wirksam beschützt werden. Unterhalb

Digitized by Google

des untersten Sporangiophors befindet sich der Annulus, d. i. die höchste Blattscheide, jedoch von reduziertem Typus. Er vervollständigt den Schutz an der Stelle, wo er sonst fehlen würde.

Die Sporangiophoren der Calamarien sitzen der Achse direkt auf; ihr Bau stimmt mit dem der Sporangiophoren von Equisetum als die der alternierenden Quirle steriler Blätter. An den Internodien stehen sie zuweilen an der Basis, manchmal an der oberen Grenze, oft in der Mitte; auch darin zeigt sich ihre Unabhängigkeit von den sterilen Blättern. Alles das ergibt, daß sie andersartige Gebilde sind als die sterilen Blätter des Strobilus.

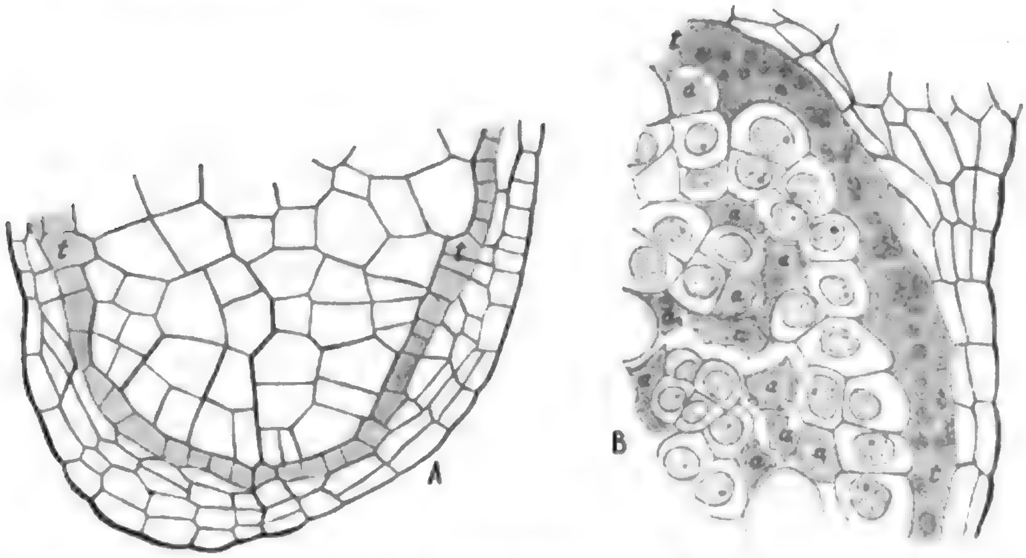


Fig. 69a. Equisetum Limosum. A Sporangiumscheitel, das sporogene Gewebe umgeben von dem Tapetum (schattiert) und der Sporangiumwand. B Teil eines älteren Sporangiums, das Tapetum (t) noch deutlich, seine Zellen jedoch nicht mehr gegeneinander abgegrenzt; innen das sporogene Gewebe, von dem gewisse Zellen (a) zugrunde gehen. Vergrößerung 200 fach.

so überein, daß kein Zweifel über deren wirkliche Homologie bestehen kann. Die Frage ist also, welcher Art sind die Sporangiophoren? Die am meisten vertretene Ansicht ist die, daß der Sporangiophor ein modifizierter Blattzahn sei. Das scheint hervorzugehen einmal aus der Aehnlichkeit der Struktur von Anfang an, dann aus der Gleichartigkeit der Stellung zur Achse und endlich daraus, daß der Annulus und gelegentliche Abnormitäten Uebergänge zwischen beiden zu liefern scheinen. Diese Schlüsse wären auch wohl kaum bezweifelt worden, wäre nicht der Aufbau des Strobilus der Calamarien gewesen, in welchem sterile Deckblätter vorhanden sind (Fig. 67, 1, 5). Die alternierende Aufeinanderfolge dieser Blätter wird nicht gestört durch die Gegenwart der Sporangiophoren. Wollte man nun die Sporangiophoren mit Recht als Blätter ansehen, so müßte vorausgesetzt werden, daß die alternierende Stellung der sterilen Blätter gestört würde da, wo die Sporangiophoren zwischen ihre Wirtel eintreten: aber das ist nicht der Fall. Fernerhin, obwohl die Zahl der Sporangiophoren häufig die Hälfte derjenigen der sterilen Blätter beträgt, so ist dieses numerische Verhältnis nicht streng aufrecht erhalten, auch ist ihre Anordnung in vertikalen, nicht alternierenden Reihen nach einem anderen Plan getroffen,

Dieser Schluß scheint unvereinbar mit den Tatsachen bei Equisetum, wo der Annulus gewöhnlich als ein Uebergang von den Blattwirteln zu den Sporangiophoren betrachtet worden ist.

Ein Vergleich mit anderen Typen von Equisetenstrobili liefert die folgende Erklärung des Equisetumstrobilus: In dem Genus Archaeocalamites (Bornia) beschreibt Renault für Bornia radiata, daß die Fruktifikation einfach oder aber in gewissen Abständen durch Blattwirtel unterbrochen ist, sodaß die Aehre ein gegliedertes Aussehen erhält und von sehr verschiedener Länge sein kann. Es sind also die Stücke der Achse, die Sporangiophoren tragen, variabel, und es scheint nun, daß der Equisetumtypus bloß ein extremer Fall ist, in welchem die ganze Reihe der Sporangiophoren, die den terminalen Strobilus bilden, insgesamt über der letzten Blattscheide steht, und daß letztere reduziert ist und als Annulus erscheint. Nach dem jetzigen Stand der Kenntnisse fehlen noch die Beweise für die Phyllomtheorie wie auch für die Nicht-Phyllomtheorie der Sporangiophoren; jedoch sprechen die Fossilien zugunsten der letzteren.

Endlich muß erwähnt werden, daß, obwohl Equisetum selbst homospor ist, bei den Calamariaceen Heterosporie beobachtet worden ist. Figur 67, 4 zeigt das bei Calamostachys

Digitized by Google

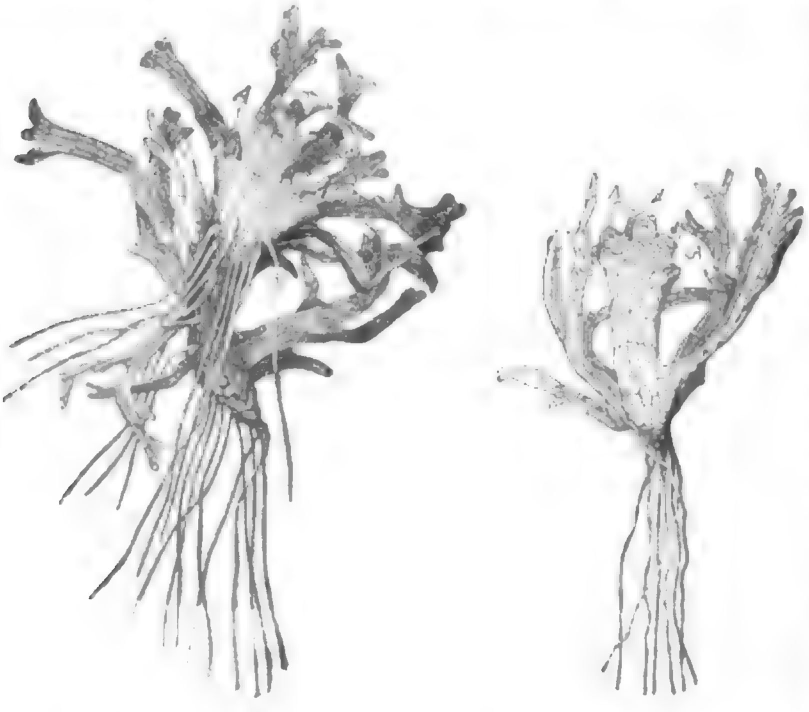
Casheana, an einem Querschnitt durch einen Sporangiophor mit 4 Sporangien; 3 von diesen enthalten relativ große Sporen (Megasporen), das vierte hat nur kleine Sporen (Mikrosporen).

Die Sporophytgeneration der Equisetales, der modernen und fossilen, ist also sehr gleichförmig, eigentümlich für sich und verschieden von der anderer Phyla. Die lebenden Species sind meist klein, verglichen mit den Calamarien. Die größte europäische Species ist Equisetum maximum; auf den Antillen und in Südamerika erreicht Equisetum giganteum Höhen bis zu 12 m. Der Stamm bleibt jedoch dünn, er hat kein sekundäres Dickenwachstum, und die Pflanze erhält die mechanische Stütze zum Teil von der Vegetation, mit und unter der sie wächst.

Die grünen Sporen keimen sofort, sie behalten ihre Lebensfähigkeit nicht lange. Das entstehende Prothallium ist in der Form äußerst variabel. Es ist gewöhnlich gelappt, zuerst nur eine Zellschicht dick, ohne lokalisiertes apikales Wachstum. Die besser ernährten Prothallien werden weiblich, die schlechter ernährten männlich; die Diöcie wird also durch die Ernährung bestimmt, sie ist nicht in der Spore schon festgelegt. Die männlichen Prothallien sind gelappte Zellflächen, die die Antheridien an den Rändern tragen (Fig. 70, II); diese sind in das Gewebe eingesenkt und enthalten zahlreiche Spermatocyten. Wenn sie reif sind, brechen sie auf und entlassen Spermatozoiden mit vielen Geißeln. Die weiblichen Prothallien sind größer; sie bestehen aus einem zentralen massigen Teil, welcher die Archegonien trägt, und aus zahlreichen dünneren Lappen, welche vom Rande des ersteren entspringen. Goebel hat nachgewiesen, daß das Prothallium nicht etwa radiär gebaut ist, sondern tatsächlich dorsiventral, mit einer starken Verdickung auf der Schattenseite (Fig. 70, I). Die Archegonien haben einen vorspringenden Hals, ihr Bauch ist tief eingesenkt in das Gewebe des Prothalliums. In Einzelheiten des Prothalliums und der Sexualorgane zeigen die Equisetales größere Uebereinstimmung mit den Filicales als mit den Lycopodiales: das gilt ganz besonders für die Spermatozoiden.

Der Hals des Archegoniums ist aufwärts gerichtet. Nach der Befruchtung teilt sich die Zygote zunächst durch eine horizontale Basalwand; diese trennt die epibasale Region, aus der der Sproß entsteht, von der hypobasalen Region. Ein Suspensor ist nicht vorhanden (Fig. 71). Es erscheint natürlich, die ganze epibasale Hemisphäre als Bildungselement des Sprosses anzusehen. Die Stammspitze mit ihrer Scheitelzelle entsteht am Mittelpunkt durch den einfachsten möglichen Teilungsverlauf, indem Oktantenwände sich bilden; aus den peripheren Teilen der epibasalen Region entsteht die erste Blattscheide mit ihren 3 Zähnen. Der so entwickelte Sproß wächst direkt aufwärts. Die hypobasale Hälfte des Embryos ist inzwischen zum „Fuß" angeschwollen, welcher in Kontakt mit dem Prothallium bleibt, nachdem die junge Pflanze hervorgewachsen ist. Die Wurzel entsteht seitlich an der hypobasalen Zone bei Equisetum arvense und Equisetum palustre (Fig. 71, 4, 7), bei Equisetum hiemale dagegen wird sie seitlich in einem gewissen Abstande von der Basis, ja manchmal sogar an der epibasalen Hemisphäre gebildet. Der ganze Embryo besteht also aus einer spindelförmigen Achse mit fortgesetztem apikalem Wachstum; seine Basis ist ohne Suspensor. Die Blätter und Wurzeln erscheinen als Anhangsgebilde an dieser Spindel.

Die Gruppe der Equisetales steht ziemlich isoliert. Am nächsten verwandt sind sie wohl mit den Sphenophyllales, d. h. mit Organismen, bei welchen schon sehr früh lange Achsen mit mäßig großen, quirlig angeordneten Blättern in die Erscheinung traten. Die Wurzel erscheint



I II

Fig. 70. Equisetum pratense. I. Weibliches Prothallium von der Unterseite, mit Archegonien (A). II. Männliches Prothallium mit Antheridien (A), d deren Deckelzellen. I. Vergrößerung 17fach, II. Vergrößerung 12fach. Nach Goebel.

Digitized by Google

als Anhangsgebilde des Sprosses. Sporenbildung tritt bei keinem bekannten Equisetalentypus frühzeitig auf, sondern erscheint erst spät im Leben des Individuums. Die vergleichende Betrachtung zeigt, daß die Sporenerzeugung nicht auf Zweige einer bestimmten Ordnung beschränkt ist; Uebertragung der Fortpflanzungsfunktion von Zweigen der einen auf Zweige einer anderen Ordnung kommt in der Natur vor. Dies zusammen mit der Tatsache, daß die Zweige aller Ordnungen im wesentlichen gleich gebaut sind, macht es wahrscheinlich, daß die Achsen niedereren Ranges und selbst die primäre Achse fertil gewesen sein mögen bei den primitiven Equisetoidtypen. In der Tat läßt sich das ausgearbeitete Sproßsystem, das die Formen der Familie aufweisen, mit dieser fortschreitenden Sterilisation erklären.

So können selbst die kompliziertesten Typen der Equisetales gedeutet werden als Ergebnis einer Entwickelung, charakterisiert durch Verzweigung und progressive Sterilisation, ausgehend von dem einfachen Sproß mit seinen Anhängseln. Mit dieser Anschauung von der allgemeinen Morphologie stimmt überein die Entwickelung des Embryos von Equisetum. Die Anatomie der Gefäßbündel endlich, die so lange eher für phanerogam als für pteridophytisch gehalten wurde, ist nun ihrer Entstehung nach auf eine primitive Monostele zurückgeführt. Die Struktur derselben bei der bekannten Form ist ja allerdings weit entfernt von dem Zustand eines soliden Xylemkernes. Aber das Xylem, das noch übrig geblieben ist, kann als der rudimentäre Rest desjenigen einer primitiven Monostele angesehen werden. Diese Charaktere zusammen genommen weisen mit einiger Gewißheit auf eine strobiloide Abstammung des Sporophyts der Equisetales hin.

3. Lycopodiales.

Wenn man die Pteridophyten nach der Kompliziertheit des Baues ihrer Anhangsgebilde und besonders der sporenerzeugenden Teile anordnen wollte, so kämen die Lycopodiales oder Bärlappgewächse an die erste Stelle zu stehen; denn ihre Anhangsgebilde sind die einfachsten von allen. Die Sporangien sind alle isoliert, jedes hängt mit seinem Sporophyll in der Medianebene zusammen. Darin nehmen sie eine Sonderstellung unter den Gefäßpflanzen ein.

Die Lycopodiales sind gegenwärtig ziemlich gut vertreten auf der Erde; doch gehören dazu auch einige der ältesten Fossilien, die man kennt. In der paläozoischen Periode bildeten solche Pflanzen einen wesentlichen Bestandteil der Vegetation. Zu jener Zeit wuchsen sie zu Bäumen heran, während die heutigen Lycopodiales relativ kleine Organismen sind. Das Phylum hat also eine große Vergangenheit.

Da die Blätter verhältnismäßig klein sind, so bildet die Achse den Hauptbestandteil des Sprosses. Bei den meisten Species ist sie zudem verzweigt und zwar in der Regel

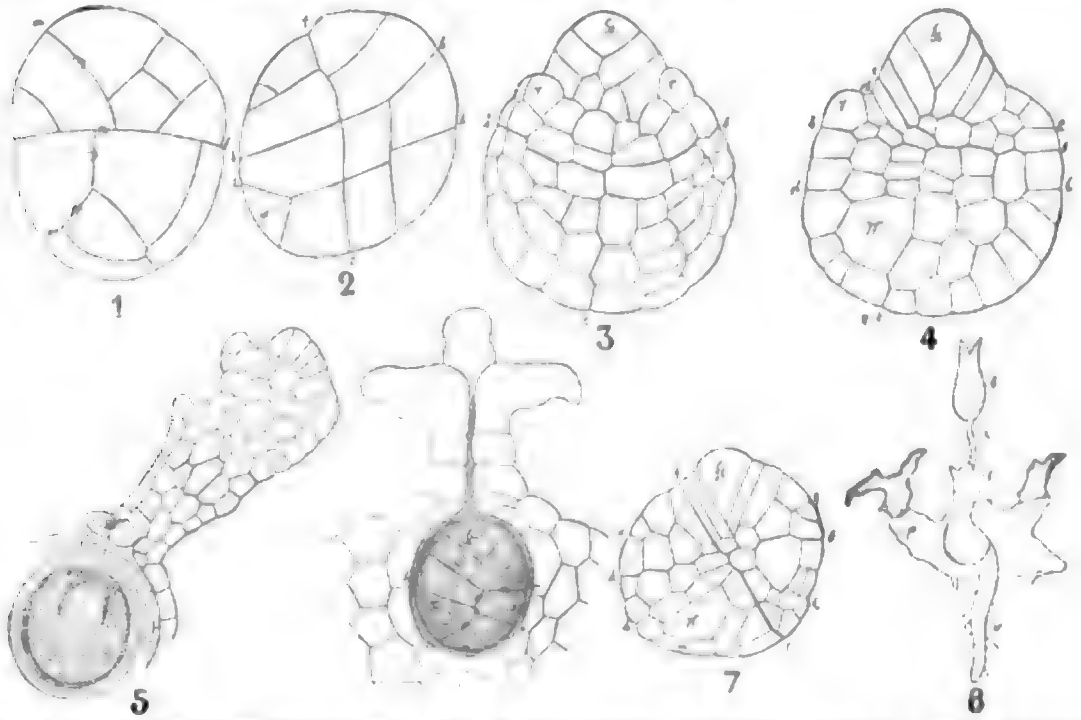


Fig. 71. 1 bis 5 Embryoentwickelung von Equisetum arvense, 6 und 7 von Equisetum palustre. Nach Sadebeck. 8 Prothallium mit junger Pflanze. Nach Hofmeister. 1 bis 2 derselbe junge Embryo in zwei verschiedenen Lagen. 3 und 4 weiter vorgeschrittener Embryo. Entwickelung des Stammes und der Blattscheide. 5 Noch weiter entwickelter Embryo, noch im Archegonium. 6 Junger Embryo im Archegonium. 7 Freipräparierter Embryo. 8 Senkrechter Durchschnitt eines Prothalliumlappens mit Keimpflanze. w Wurzel, b die Blattscheiden.

Digitized by Google

dichotom. Die Pflanzen sind im Substrat mit Adventivwurzeln befestigt, die oft dichotom verzweigt sind.

Die Lycopodiales werden in zwei Abteilungen zerlegt, gemäß dem Vorhandensein oder dem Fehlen einer Ligula. Dieses ist ein kleines, schuppenförmiges Anhangsgebilde an der Oberseite der Blätter nahe der Basis, oft für das bloße Auge nicht sichtbar. Zu den Eligulatae, ohne Ligula, gehören die Lycopodiaceae mit den lebenden Genera Lycopodium und Phylloglossum und mit gewissen alten Fossilien, die als Lycopodites bezeichnet werden. Die Ligulatae, mit einer Ligula, umfassen unter den lebenden Formen Selaginella und Isoetes, dazu die fossilen Lepidodendraceae und Sigillariaceae, welche die Hauptmasse der fossilen Lycopodiales ausmachen. Die Eligulatae sind homospor, die Ligulatae heterospor.

A. Eligulatae.

Das Genus Lycopodium mit seinen etwa 100 lebenden Arten wurde von Spring eingeteilt nach dem Grade der Differenzierung der verschiedenen Species. Er unterschied zwei Hauptabteilungen des Genus; die erste umfaßt diejenigen Formen, deren Sporangien über die ganze Länge des Sprosses verteilt sind, die zweite jene, bei denen die Sporangien zu begrenzten Zapfen vereinigt sind. Wenn auch in den Einzelheiten das Schema von Spring Aenderungen erfuhr, so beruht doch die gegenwärtige Einteilung des Genus noch auf Merkmalen, die durch die fortschreitende Differenzierung der sterilen und fertilen Teile der Pflanze gegeben sind. Die Abteilungen von Spring fallen im wesentlichen zusammen mit den Subgenera Urostachya, das die primitiveren Formen umfaßt, und Rhopalostachya, zu dem die Formen mit einem Zapfen oder terminalen Strobilus gehören.

Ein wohlbekanntes Beispiel des Subgenus Urostachya ist Lycopodium Selago (Fig. 72). Das ist eine Staude mit dichotom verzweigter Achse, die zahlreiche kleine, unter sich gleiche Blätter trägt. An der Basis der Pflanze findet sich gewöhnlich eine sterile Zone; auf diese folgen abwechselnd fertile und sterile Zonen, da das mittlere Stück des jeweiligen jährlichen Zuwachses fertil ist. Der einzige Unterschied zwischen den sterilen und den fertilen Zonen ist das Fehlen oder Vorhandensein der Sporangien; und da unvollkommene Sporangien an den Grenzen der fertilen Zonen sich finden, so kann man schließen, daß die Pflanze aus einem Typus hervorgegangen ist, der durchweg fertil war. Ein solcher Typus wird nahezu erreicht von der großen Species Lycopodium Trencilla aus den Anden, die von einem bis zum anderen Ende fertil ist.

Ein bekanntes Beispiel des Subgenus Rhopalostachya sehen wir in Lycopodium clavatum (Fig. 73 G). Der sterile kriechende Sproß ist hier streng abgesetzt von dem distalen, fertilen Teil. Das ist nicht nur äußerlich so, sondern es sind auch die Sporophylle der fertilen Aehre breit und häutig, sie dienen zum Schutz und nicht der Assimilation (Fig. 73 H). Das Sporangium ist nierenförmig und sitzt dem Sporophyll an der Basis an. Zu diesem Subgenus gehört die Mehrheit der Arten. Einige leben auf dem

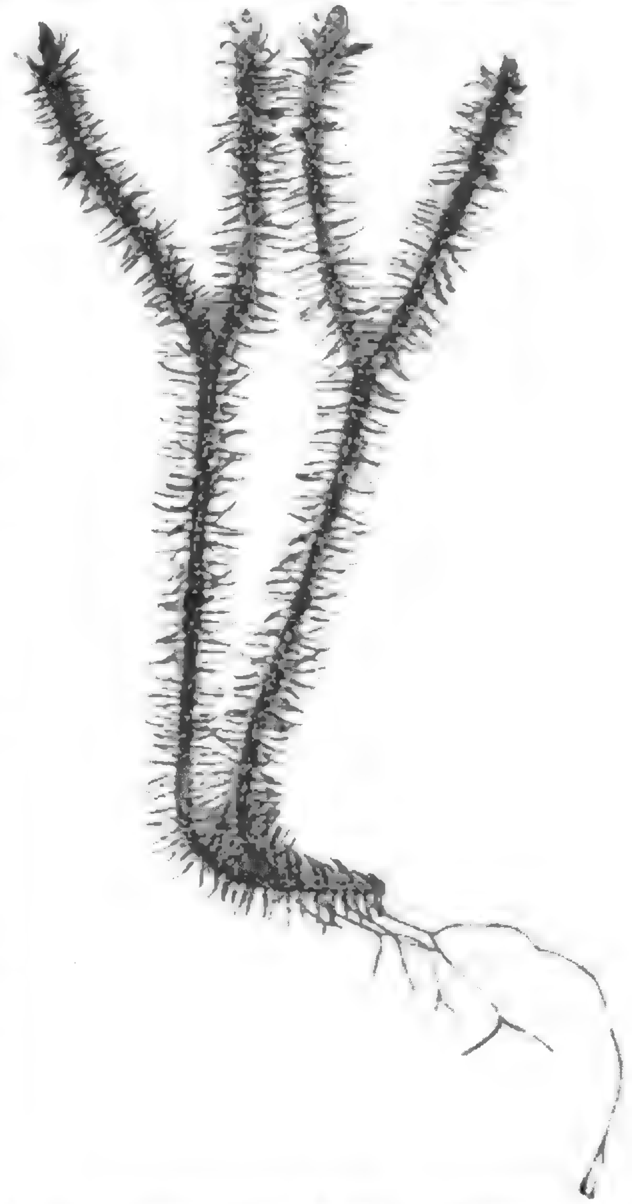


Fig. 72. Lycopodium Selago L. Dichotomer Sproß einer alten Pflanze mit den alternierenden sterilen und fertilen Zonen.

Boden, andere epiphytisch, manche haben sogar einen kletternden Habitus angenommen und sind dorsiventral geworden. Die Formen des Genus zeigen in der Tat beträchtliche Anpassung, wie an den fortgeschritteneren Vertretern zu sehen ist.

Das einzige andere lebende Genus ist das monotypische Phylloglossum in Australien und auf Neuseeland. Die reife Pflanze erscheint als ein Büschel von fast zylindrischen Blättern, aus deren Mitte sich eine Achse er-

Digitized by Google

hebt, die einen einfachen Strobilus trägt. Im Boden hat sie zwei Speicherknollen, eine vorjährige und eine in Entwickelung begriffene, in der für das nächste Jahr ge-

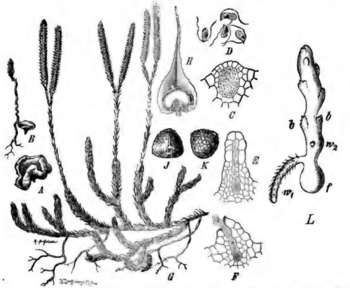


Fig. 73. Lycopodium clavatum. A älteres Prothallium. B Prothallium mit junger Pflanze. C Antheridium, noch geschlossen, quer. D Spermatozoiden. E jüngeres, noch geschlossenes Archegonium, F befruchtungsreifes, geöffnetes Archegonium. G Sporangientragende Pflanze. ½ natürliche Größe. H Ein Sporophyll mit aufgesprungenem Sporangium. I und K Sporen in zwei Ansichten. Nach Bruchmann. Aus Strasburgers Lehrbuch.

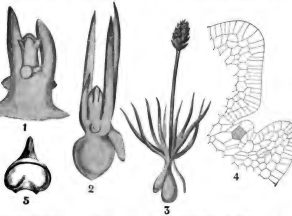


Fig. 74. Phylloglossum Drummondii. 1 bis 3 Bildung der Sporangienähre. 4 Längsschnitt einer sehr jungen Sporangienähre, die Initialzellen des Sporangiums zeigend. 5 Sporophyll mit aufgesprungenem Sporangium.

Digitized by Google

speichert wird. Ferner sind eine oder mehrere Wurzeln vorhanden (Fig. 74, 8). Wir werden später sehen, daß Phylloglossum in seinem jährlichen Wachstum die embryonalen Stadien eines Lycopoden wiederholt.

Die zu den Eligulatae gerechneten Fossilien sind leider selten und relativ klein. Sie sagen uns aber, daß wir es hier nicht nur mit rezenten Typen zu tun haben.

Die Anatomie von Lycopodium ist charakterisiert durch eine Stele mit peripherem Protoxylem, oft mit einem soliden Xylemkern, der für primitiv gehalten wird: d. h. wir haben eine Protostele. Die Blattspuren sind an der Peripherie der säulenförmigen Stele

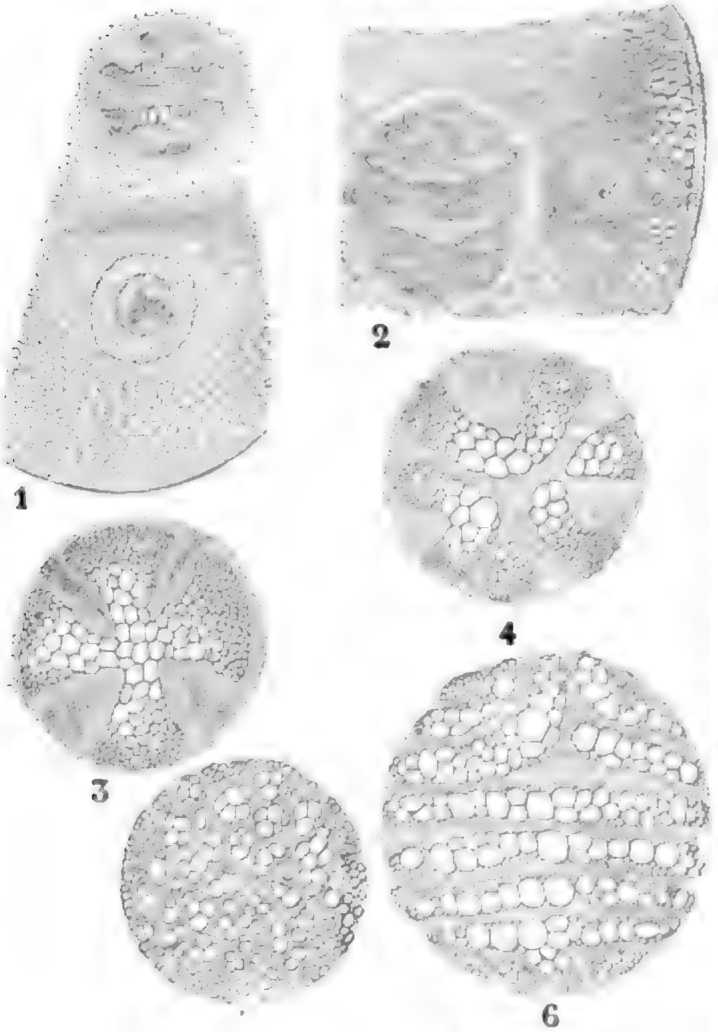


Fig. 75. 1 Lycopodium Phlegmaria. Teil eines Querschnittes durch ein älteres Stengelstück, im Rindenkörper eine abwärts wachsende Wurzel. 2 Teil eines Querschnittes durch einen Sproß von L. Chamaecypariosus. 3 Querschnitt durch die Stele von L. serratum. 4 Ebenso von L. annotinum. 5 Ebenso von L. cernuum. 6 Ebenso von L. volubile. 4 nach Sachs, die übrigen nach Pritzel.

mit dem Minimum lokaler Störung inseriert; diese erweist sich durch ihre Entwickelung als Stammbündel. Die Blätter stehen bisweilen in regelmäßigen Wirteln, häufig aber auch in einer mehr oder weniger unregelmäßigen Spirale. Von jedem Blatt tritt ein Gefäßstrang in die Achse ein und verläuft in dieser schief nach unten gegen die Stele hin, um sich schließlich mit dieser zu vereinigen. Bei dem weniger differenzierten Urostachya besteht die Stele aus einer zusammenhängenden zentralen Xylemmasse, die unregelmäßige Sternform annimmt (Fig. 75, 3), wobei die kleineren Protoxylemtracheiden peripher stehen. Bei dem höher differenzierten Rhopalostachya dagegen erscheint auf einem Querschnitt das Xylem in getrennten Gruppen angeordnet (Fig. 75, 4 bis 6). Diese Xylemmassen stehen jedoch ober- und unterhalb der Schnittebene miteinander in Verbindung und das Ganze hat etwa die Struktur eines Xylemschwammes, dessen Zwischenräume durch Phloem ausgefüllt sind. Das ist ein höheres Stadium als die einfache Protostele, wir treffen es bei der fortgeschrittenen Sektion des Genus.

Die größeren zylindrischen Wurzeln zeigen fast denselben anatomischen Bau wie der Stamm. Sie verzweigen sich dichotom und haben am Scheitel eine Wurzelhaube, die das kleinzellige, geschichtete Meristem bedeckt. Auch der Stammscheitel ist teilweise geschichtet; bei Lycopodium Selago jedoch lassen sich die verschiedenen Gewebe auf eine Gruppe von drei Initialen zurückführen. Das Plerom erstreckt sich bis über die jüngsten Blätter hinaus, woraus hervorgeht, daß diese akzessorische Gebilde an der dominierenden Achse sind.

Die Pflanzen sind alle perennierend: in einigen Fällen, so bei Lycopodium inundatum, geschieht die Ueberwinterung mit Hilfe einer terminalen Knospe. Sie können sich vegetativ vermehren durch Bulbillen, wie sie gewöhnlich bei Lycopodium Selago zu sehen sind. Die sexuelle Fortpflanzung mit Hilfe eines Prothalliums mit Sexualorganen war lange Zeit unbekannt. Das hat seinen Grund hauptsächlich darin, daß die Prothallien bei den meisten Species unterirdisch wachsen: auch für die Keimung der Sporen sind besondere Bedingungen erforderlich. Jedoch durch beharrliche und sorgfältige Sammlung von Material ist es gelungen, bei einer Anzahl von Species die Entwickelung vollständig zu erforschen, und es haben sich für die Vergleichung sehr interessante Resultate ergeben.

Der erste Schritt ist die Bildung der Sporen, die, wie schon erwähnt, bei den Eligulatae alle gleichgestaltet sind. Sie werden in sitzenden, nierenförmigen Sporangien erzeugt, die ziemlich groß und zwischen dem sie tragenden Sporophyll und der Achse ausgebreitet sind. Die reifen Sporangien reißen auf parallel der Ebene des Sporophylls (Fig. 73 H). Die Zahl der Sporen im Sporangium ist sehr groß. Das Sporangium geht hervor aus einer wurstförmigen Gruppe von Zellen an der Oberfläche des

Digitized by Google

Blattes nahe der Basis. Innerhalb dieser Gruppe teilt sich bei Lycopodium Selago eine einzige Zellreihe periklin, so daß eine innere Reihe von sporogenem Gewebe und eine äußere Reihe hervorgeht, welche schließlich bei der Bildung der Sporangiumwand beteiligt ist (Fig. 76, 4, 5). Ein Tangentialschnitt zeigt, daß die Zahl der Zellen in der sporogenen Reihe ungefähr 7 ist (Fig. 76, 7). Bei anderen Species, so bei Lycopodium clavatum, bei welchem das Sporangium gierend, durch, der fertige Sporophyt ist dann wieder im wesentlichen übereinstimmend gebaut. Die Unterschiede der Prothallien des Genus Lycopodium sind mehr solche der Gestalt und der Ernährungsweise als des Grundbaues. Es lassen sich 3 Haupttypen unterscheiden. Der Typus des Lycopodium cernuum besteht aus einem massiven, zylindrischen Thallus, dessen unterer, konischer Teil im Boden steckt; der obere Teil ragt hervor, ist grün und mit un-

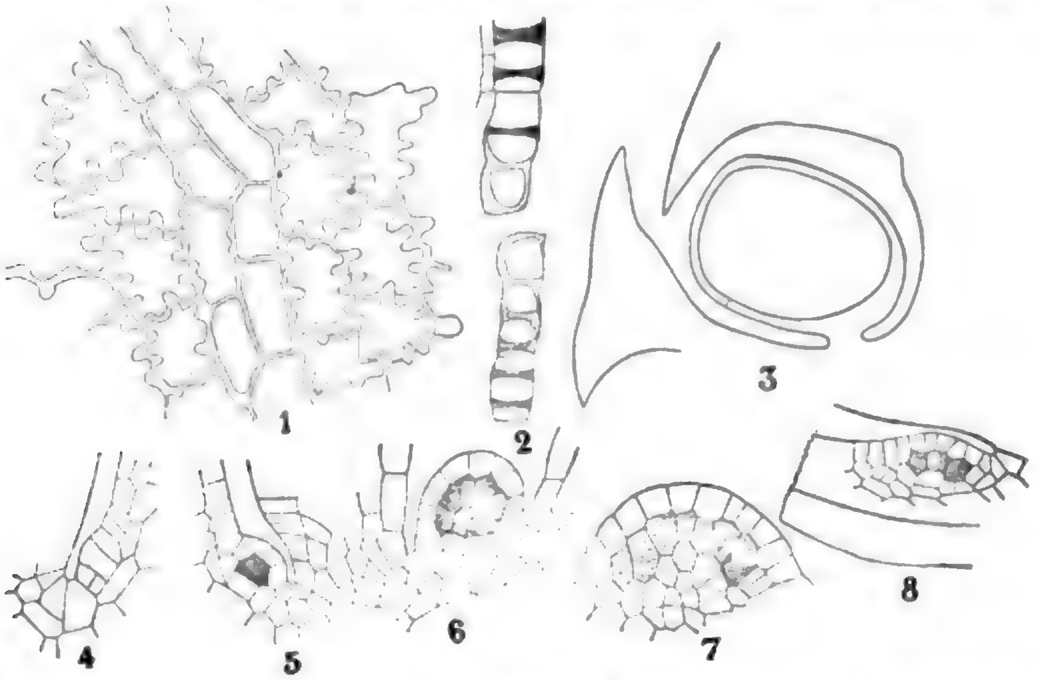


Fig. 76. 1 bis 2 Lycopodium clavatum. 1 Stück der Flächenansicht der Sporangiumwand, in der Mitte den Annulus zeigend. 2 Stücke des Längsschnittes, die Annuluszellen sind beim Schneiden voneinander getrennt worden. Nach Goebel. 3 Lycopodium inundatum. Längsschnitt durch ein Sporangium, die Oeffnungsstelle ist durch einen Strich in der Sporangiumwand angedeutet. Nach Goebel. 4 bis 7 Lycopodium Selago, Entwickelung des Sporangiums. 4 bis 6 Radialschnitte. 7 Tangentialschnitt. 8 Lycopodium clavatum. Radialschnitt eines jungen Sporangiums.

massiger ist, können 2 oder 3 solcher Reihen von sporogenen Zellen gebildet werden (Fig. 76, 8). Die Sporangiumwand besteht gewöhnlich aus drei Schichten: die innerste ist das später aufgebrauchte Tapetum, die äußerste wird verhärtet und dient zum Schutz, die Dehiszenzlinie ist in der Struktur vorgebildet. Die Zellen des sporogenen Gewebes teilen sich mehrfach, um endlich die Tetradenteilung einzugehen, durch welche die tetraedrischen Sporen gebildet werden. Bei den weiter spezialisierten Formen werden die Sporangien bis zur Reife geschützt durch das sie überdeckende Sporophyll (Fig. 76, 3).

Der Sporophyt der Eligulaten zeigt eine bemerkenswerte Einförmigkeit der Typen; Verschiedenheiten finden sich nur in sekundären Einzelheiten. In der Embryologie jedoch zeigen sich deutliche Unterschiede, die mehr oder weniger sichtbar mit Verschiedenheiten der lterlichen Prothallien in Korrelation stehen. In der Tat machen Prothallium und Embryo eine verwandte Entwickelung, von einem mittleren Typus diver-

regelmäßigen, blattartigen Lappen versehen (Fig. 77). Er ernährt sich selbst, obschon ein endophytischer Pilz vorhanden ist. Die Sexualorgane stehen zwischen den Lappen, die jüngsten sind einer am Rande des zylindrischen Körpers gelegenen meristematischen Zone am nächsten. In der Hauptsache wird die Ernährung durch die assimilierenden grünen Teile besorgt, die saprophytische Ernährung ist nebensächlich. Der Typus des Lycopodium clavatum und complanatum zeigt überwiegend saprophytische Ernährung; denn die Prothallien wachsen unterirdisch, die grünen

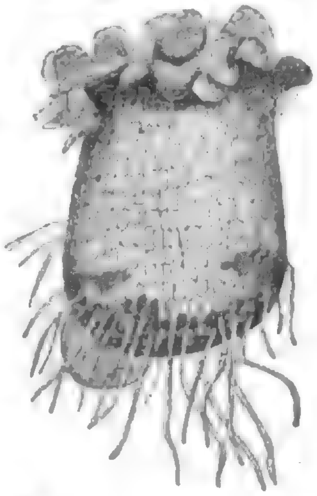


Fig. 77. Lycopodium cernuum. Prothallium. Nach Treub.

Lappen fehlen. Die Sexualorgane nehmen dieselbe Stellung ein wie im vorigen Typus. Der untere Teil des Prothalliums ist für die saprophytische Ernährung spezialisiert (Fig. 78). Den dritten Typus finden wir bei epiphytischen Arten, z. B. Lycopodium phlegmaria, deren Prothallien fadenförmig und wiederholt verzweigt sind. Die zarten, farblosen Zweige erstrecken sich weithin durch die tote Borke, auf welcher die Prothallien wachsen. Die Ernährung ist saprophytisch. Diese Prothallien erzeugen oft Gemmen. Die Sexualorgane stehen auf der Oberseite verbreiteter Zweige des Thallus. Es ist interessant zu sehen, daß das Prothallium des primitiven Lycopodium Selago Anhaltspunkte gibt zur Verbindung dieser anscheinend divergenten Typen. Die Entwickelungsweise seines Prothalliums variiert nämlich (Fig. 79). Es ist gewöhnlich ein blasser, unterirdischer Körper, bisweilen aber auch oberirdisch und grün: die Sporen scheinen entweder unter oder über der Erde zu keimen. Die Gestalt des Thallus ist verschieden gemäß seiner Lage: wenn unterirdisch gewachsen, ist sie länglich, die oberirdischen dagegen sind breit konisch, wie die der anderen oberirdischen Typen. So stellt denn wohl der konische Typus die Grundform dar, die entsprechend der Umgebung spezielle Umwandlungen aufweist.

Die Antheridien und Archegonien stehen

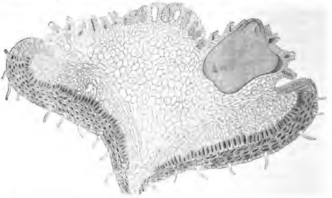


Fig. 78. Lycopodium clavatum. Prothallium im Längsschnitt. Nach Bruchmann.

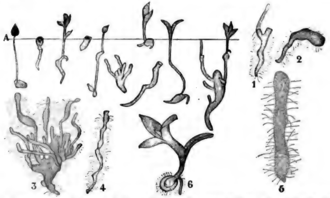


Fig. 79. Lycopodium Selago. A Prothallien von in verschiedener Tiefe gekeimten Sporen gebildet, die punktierte Linie gibt die Oberfläche des Bodens an. 1 bis 4 verschiedene Prothallienformen. 5 Normales Prothallium, stärker vergrößert. 6 Junge Pflanze, noch mit dem Prothallium in Verbindung. Nach Bruchmann.

Digitized by Google

am terminalen Scheitel, erstere in der Mitte, letztere am Rande (Fig. 78). Die Antheridien sind tief eingesenkt, sie enthalten eine große Zahl von Spermatocyten (Fig. 73, C). Die Archegonien stecken ebenfalls im Gewebe des Prothalliums, der Hals jedoch ragt hervor. Sie sind ausgezeichnet durch eine lange Reihe von Kanalzellen, wogegen das Ei an der Basis kaum größer ist als eine derselben (Fig. 73, E, F). Die Spermatozoiden tragen 2 Cilien (Fig. 73, D).

Wie groß auch die Unterschiede sein mögen, welche die verschiedenen Embryotypen von Lycopodium aufweisen, so finden wir doch bei allen Species, deren Embryogenie genau bekannt ist, ein Stadium am eine Gewebszone zwischen dem Suspensor und der oberen Etage wäre, während er mit dem Suspensor die Funktion teilt, die Verbindung mit dem Prothallium aufrecht zu erhalten.

Den am wenigsten spezialisierten Embryo hat Lycopodium Selago (Fig. 80 obere Reihe, 2 bis 6). Der Fuß entsteht hier aus der unteren Etage, alles andere aus der oberen. Der Fuß ist nur schwach entwickelt. Aus der Mitte der oberen Etage geht der Stammscheitel hervor, seitlich entsteht das erste Blatt, der Cotyledo, dem andere folgen. Das Hypocotyl streckt sich, so daß die ersten Blätter über die Erde gehoben werden. Die erste Wurzel entsteht exogen aus der oberen Etage,

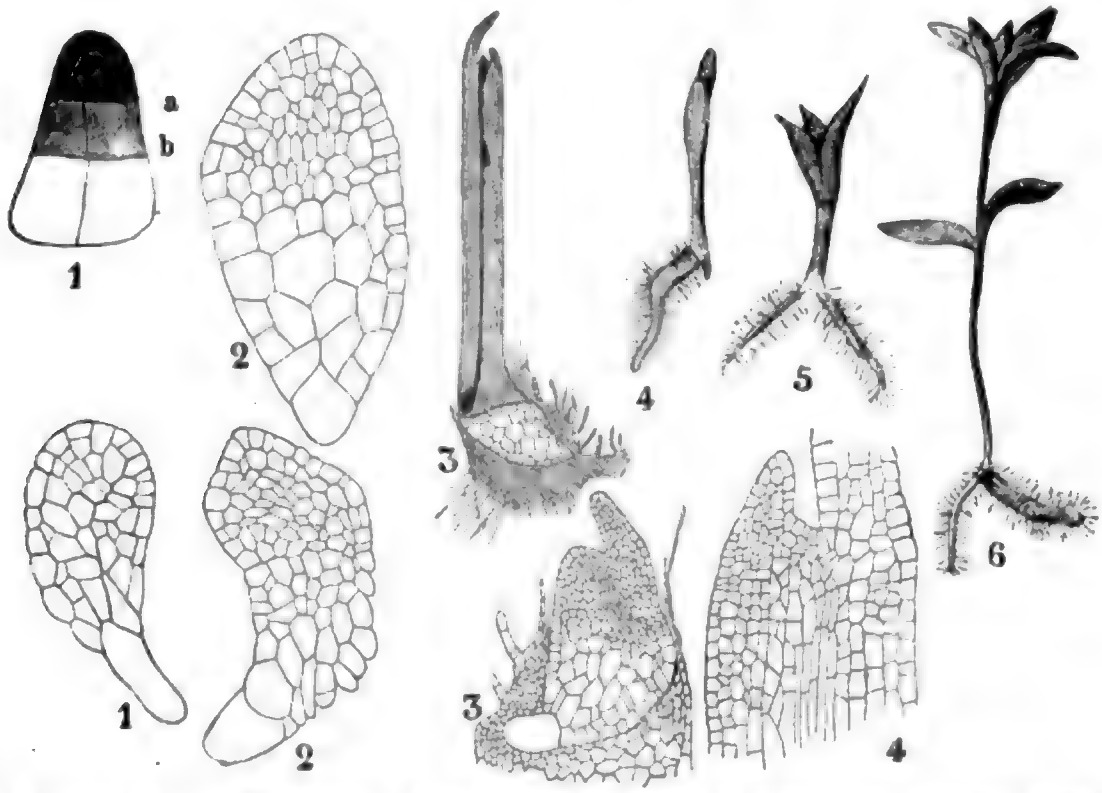


Fig. 80. Obere Reihe: 1 Diagramm, die erste Segmentierung der Zygote von Lycopodium zeigend. a die erste Wand, welche den Suspensor abschneidet, b die Wand, welche die Fußetage von der Stammetage trennt, letztere weiß gelassen. 2 bis 6 weitere Entwickelung des Embryos von Lycopodium Selago. Nach Bruchmann. Untere Reihe: 1 bis 4 Entwickelungsstadien des Embryos von Lycopodium Phlegmaria. Nach Treub.

Anfang, in welchem der Embryo aus einem Suspensor und zwei Etagen aus je vier Zellen besteht (Fig. 80 obere Reihe, 1). Die Reihenfolge der ersten Teilungen, die zu diesem Stadium führen, ist verschieden. Es wird angegeben, daß aus der unteren Etage, d. i. die, die an den Suspensor anstößt, der sogenannte Fuß entsteht, und daß aus der oberen Etage alle anderen Teile des Embryos hervorgehen; diese Angabe ist durch viele Zeichnungen gestützt. Nachdem die ersten Stadien durchlaufen sind, besteht jedoch gewöhnlich keine scharfe Grenze mehr zwischen dem Fuß und den anderen Teilen: in den einfachsten Fällen sieht es so aus, als ob der Fuß nur dicht oberhalb des Fußes; ihr folgen andere Wurzeln, die an höher gelegenen Punkten endogen gebildet werden. Die einzige Komplikation in dieser sehr einfachen Embryogenie besteht in der Verlängerung des Hypocotyls; es finden sich hier keine Anschwellungen wie bei anderen Typen des Genus, welche die Verbindung der Teile unterbrechen. Diese fehlen auch beim Embryo von Lycopodium phlegmaria, der im wesentlichen mit dem von Lycopodium Selago übereinstimmt (Fig. 80, untere Reihe 1 bis 4).

Beim clavatum-annotinum-Typus ist das anders; hier muß ja der Embryo von dem

Digitized by Google

unterirdischen Prothallium an die Erdoberfläche gelangen, während dessen er seine Nahrung aus dem massigen, saprophytischen Prothallium bezieht (Fig. 73, B). Die ersten Entwickelungsstufen sind dieselben wie bei den anderen, bald aber zeigt sich eine deutliche Anschwellung des aus der unteren Etage hervorgegangenen Fußes; dieser verbleibt als Haustorium im Prothallium (Fig. 78). Inzwischen schreitet die obere Etage nur langsam zur Bildung des Scheitels und des Cotyledo (Fig. 81, 1 bis 4). Die Orientierung beider zum Fuß ist nicht konstant; das hängt damit zusammen, daß der Fuß an der Stelle erscheint, wo die Nahrung am reichlichsten ist. Der Fuß ist in der Tat ein opportunistisches Wachstumsgebilde, das den übrigen Embryo in der verschiedensten Weise verdreht und ablenkt. Bald nach den ersten Blättern erscheint die erste Wurzel. Dann durchbricht der Embryo infolge des lebhaften Wachstums des Hypocotyls das Prothallium. Während er aufwärts durch die Erde hindurch wächst, ist der Sproß blaß und trägt nur schuppenförmige Blättchen, die jedoch in grüne Blätter übergehen, wenn er an die Oberfläche gelangt ist. Offenbar ist also der clavatum-annotinum-Typus spezialisiert im Zusammenhang mit der unterirdischen Lebensweise der Prothallien.

Auch bei dem unterirdischen cernuum-Typus finden sich in der Embryogenie akzessorische Anschwellungen, die hier jedoch außerhalb des Prothalliums entstehen (Fig. 81 untere Reihe, 1 bis 3). Die Anfangsstufen sind auch hier die gleichen wie bei den anderen Species. Die untere Zelletage jedoch, die sonst zum Fuß sich entwickelt, bleibt klein und dient nur zur Verbindung des Embryos mit dem Prothallium; aus der oberen Etage entstehen wie üblich die verschiedenen Bestandteile des Embryos. Dieser durchbricht das Prothallium und erhebt sich als freiwachsendes Gebilde, wobei er jedoch zu einem knollenförmigen Körper, dem „Protocorm" anschwillt. Letzteres ist ein kugeliger, parenchymatischer Zellkörper, der in den Boden Wurzelhaare sendet. Der Entstehung nach ist er also von dem Fuß des clavatum-Typus gänzlich verschieden (Fig. 81, untere Reihe 1 bis 3). An seinem distalen Ende bildet er einen Cotyledo, dem bald andere, zylindrische Blätter in unregelmäßiger Anordnung folgen. Ziemlich spät erst ist der Stammscheitel zu erkennen, nahe dem zuletzt gebildeten Blatt; aus ihm entstehen in der Folge weitere Blätter, die den normalen Sproß zusammensetzen. Dicht an der Basis entsteht die erste Wurzel, und so ist denn die normale Pflanze angelegt.

Die Aehnlichkeit zwischen dem Embryo von Lycopodium cernuum und dem jähr-

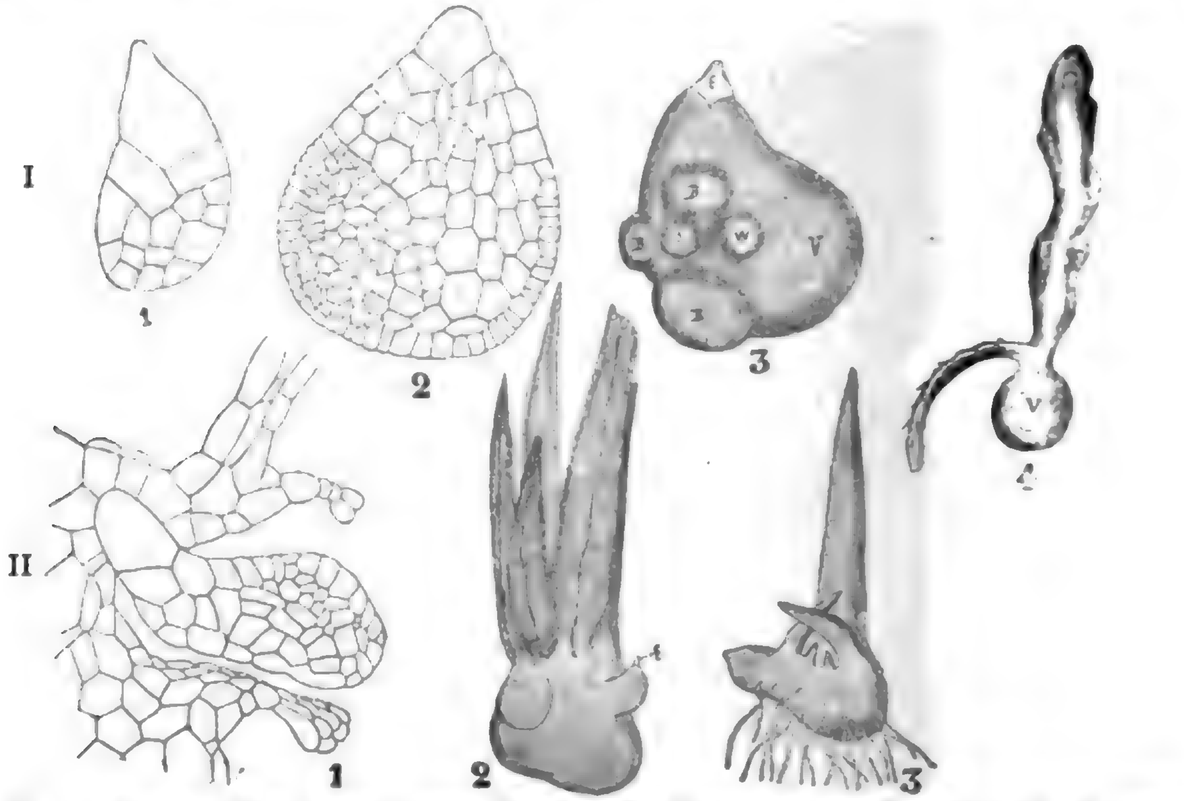


Fig. 81. I. Lycopodium annotinum. 1 und 2 Junge Embryonen im Längsschnitt. 3 Junger Embryo, von oben betrachtet. S Stammscheitel, W Wurzel, B Blätter, V Fuß, E Embryoträger. 4 Junge, unterirdisch gewachsene Keimpflanze. V Fuß. Links die erste Wurzel, oben die Stengel mit Schuppenblättern. Nach Bruchmann. II. Lycopodium cernuum. 1 Junger Embryo, aus dem Prothallium hervorsprossend, rechts der Anfang des Protocorms. 2 und 3 Embryonen, den Protocorm zeigend. E Embryoträger. Nach Treub.

Digitized by Google

lich wachsenden Phylloglossumpflänzchen ist auffallend (Fig. 74). Letzteres entsteht am Scheitel einer Speicherknolle vom vorigen Jahr; der Vegetationspunkt der Knolle wird zum Vegetationspunkt der jungen Pflanze. Vergleicht man die Knolle von Phylloglossum mit der knollenartigen Anschwellung von Lycopodium cernuum, so wird klar, daß die Beziehungen beider Gebilde zu den Protophyllen und zu der definitiven Achse dieselben sind. Daraus folgt, daß die Knolle von Phylloglossum für ein jedes Jahr wiederholtes „Protocorm" gehalten werden kann.

In allen Fällen stellt die Anschwellung ein sekundäres, biologisch zu verstehendes Gebilde dar, es ist ein weiterer Beweis für die Neigung der Lycopodiumembryonen zu derartiger Entwickelung. Lycopodium inundatum bietet eine Analogie zu dem, was wir bei Phylloglossum sehen: diese Art geht im Winter zugrunde, mit Ausnahme der Spitze des kriechenden Sprosses, die im folgenden Jahre weiterwächst. Wenn nun dieses Wachstum vorbereitet und gefördert würde durch die Bildung einer lokalen Anschwellung mit Speicherstoffen, so wäre damit ein Zustand erreicht, ganz ähnlich den Verhältnissen bei Phylloglossum. Letzteres ist in der Tat ein Lycopodium mit einem spezialisierten Embryonalstadium, das jedes Jahr wiederholt wird.

B. Ligulatae.

Im allgemeinen Habitus gleichen die Ligulatae den Eligulatae. Sie unterscheiden sich von ihnen durch den Besitz der Ligula, d. i. ein kleiner Fortsatz an der Oberseite des Bla tes nahe der Basis. Außerdem sind alle lebenden Ligulatae heterospor, die Eligulatae dagegen homospor. Das wichtigste und überwiegende Genus ist Selaginella; dazu gehören ferner Isoetes und die Hauptmasse der fossilen Lycopodiales. Letztere waren große, baumförmige Typen, wie Lepidodendron, Sigillaria, Bothrodendron u. a. Jedoch nicht alle fossilen Ligulaten waren groß; auch kleinere, im Habitus den heterophyllen Selaginellen entsprechende Pflanzen dieser Gruppe fanden sich in alten Erdschichten. Manche von ihnen endlich zeigten eine Fortentwickelung die mit der Entwickelung der Samenpflanzen zu vergleichen ist.

Selaginella umfaßt über 300 Arten, die weit verbreitet sind, jedoch besonders den Schatten dichter Tropenwälder bevorzugen. Einige wenige gehen bis in die gemäßigten Zonen hinein. Während bei Lycopodium der Sproß nur ausnahmsweise dorsiventral, in der Regel radial gebaut ist, sind nur wenige Formen von Selaginella vom radiären Typus, und diese wachsen an trockeneren und helleren Orten als die dorsiventralen. Die vegetative Entwickelung ist charakterisiert durch reiche Verzweigung der Achse; bei den dorsiventralen Typen werden die Zweige verbreitert und abgeflacht, so daß sie wie Blätter aussehen (Fig. 82). Damit geht Hand in Hand eine ungleiche Entwickelung der Blätter (Anisophyllie). Bei den dorsiventralen Typen sind sie in vier Reihen angeordnet: zwei davon bestehen aus kleinen, schief aufwärts gerichteten Blättern, die anderen zwei aus großen, schief nach unten gerichteten (Fig. 82, 2). Bei diesen Species finden sich auch die eigentümlichen „Rhizophoren". Das sind nackte Zweige, die vertikal abwärts zum Boden wachsen, wo sie, obgleich sie selbst keine Wurzeln sind, doch solche erzeugen. Auf diese Weise wird der Sproß durch Wurzeln mechanisch gestützt und ernährt. Alle diese Eigentümlichkeiten sind jedoch sekundär und abgeleitet. Die primitiven Typen waren radiär, wie z. B. Selaginella spinulosa (Fig. 84, 6).

Diese Art zeigt auch eine relativ primitive Anatomie; die Merkmale ihres Gefäßsystems sind interessant im Vergleich einerseits mit Lycopodium, andererseits mit den baumförmigen Fossilien. Der untere Teil der Achse wird durchsetzt von einer zylindrischen Stele; in der Mitte des soliden Xylemkernes findet sich Protoxylem; dieses ist umgeben von einem Phloemband, einem Perizykel und der trabekularen Endodermis, d. i. eine Endodermis, deren Zellen seitlich voneinander getrennt sind, so charakteristisch für Selaginella. Das ist in Wirklichkeit eine Protostele. Weiter nach oben geht das Protoxylem in die Peripherie über, die Stele tritt in den terminalen Strobilus mit einem Mark versehen ein, indem die zentrale Masse durch dünnwandiges Gewebe ersetzt wird. Die Pflanze ist so durchweg monostel und zwar in einem primitiven Stadium. Der Zustand ist sehr ähnlich dem, wie er bei einfacheren Lycopodiumtypen anzutreffen ist, oder besser noch ist er zu vergleichen mit gewissen primitiven Formen von Lepidodendron.

Andere Species von Selaginella zeigen weitere Ausbildung in verschiedener Hinsicht. Die einfacheren dorsiventralen Species haben einfache bandförmige Stelen mit marginalem Protoxylem, an welchem die Blattspuren inseriert sind. Bei den größeren dorsiventralen Species jedoch, mit den oben erwähnten blattartigen Luftsprossen und einem unterirdischen Rhizom, kann die Achse solenostel (Selaginella laevigata) oder polystel (Selaginella inaequalifolia und Willdonovii) werden, so wie wir es ähnlich bei Farnen gesehen haben. Doch das sind wohl späte und spezielle Umwandlungen, hervorgegangen aus dem marklosen, monostelen Typus. Es zeigt sich dabei eine Parallelität der Entwickelung zwischen den Selaginellen und den Farnen;

Digitized by Google

mehr haben die bei beiden erreichten gleichen Strukturen nicht zu bedeuten.

Die Abgrenzung des Strobilus vom vegetativen Sproß ist bei Selaginella deutlicher als bei Lycopodium. Bei Selaginella spinulosa ist der Uebergang allmählich, man hat an der Basis des Strobilus unvollkommene Sporangien beobachtet; beide Regionen sind hier radiär gebaut. Aber selbst bei den Formen mit dorsiventralem Sproß ist der Strobilus gewöhnlich radial, was ohne Zweifel ein primitiver Zustand ist (Fig. 82, 2). Die Sporangien sitzen zwischen der Ligula und der Blattbasis. Die Verteilung der Mega- und Mikrosporangien ist verschieden. Letztere sind kastanienbraun, erstere heller ge-

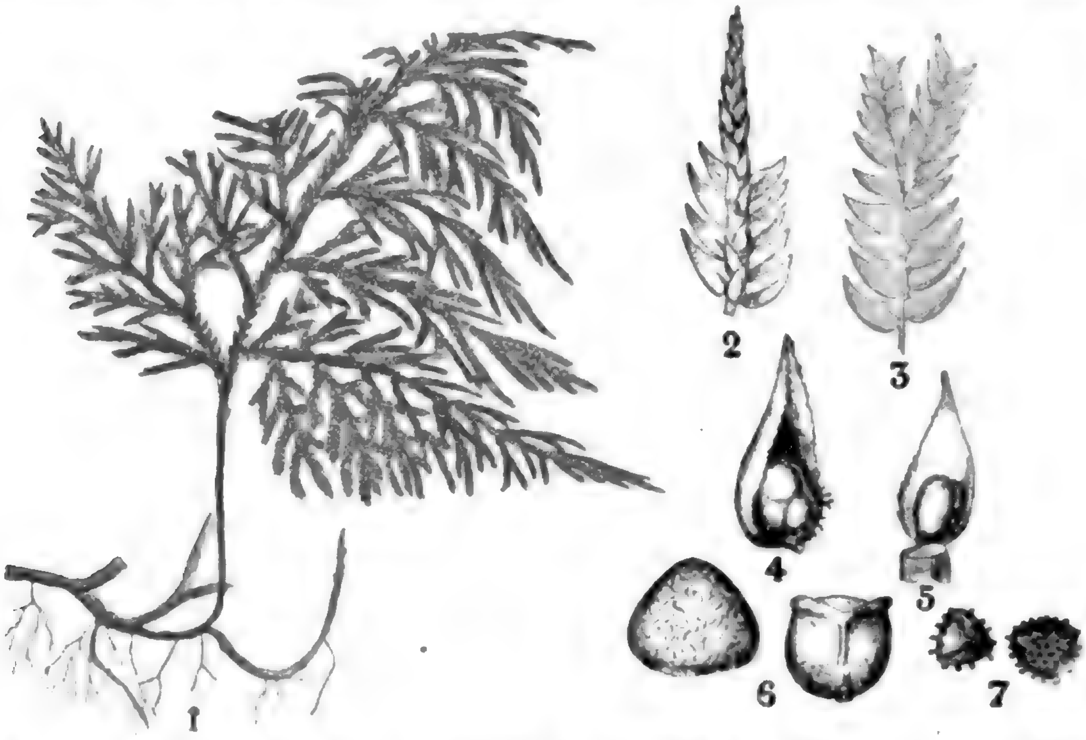


Fig. 82. Selaginella umbrosa. 1 Habitus. 2 Endzweig mit Strobilus, von der Lichtseite. 3 Endverzweigung, von der Schattenseite. 4 Sporophyll mit Megasporangium. 5 Ein solches mit Mikrosporangien. 6 Megasporen. 7 Mikrosporen. Nach Hieronymus.

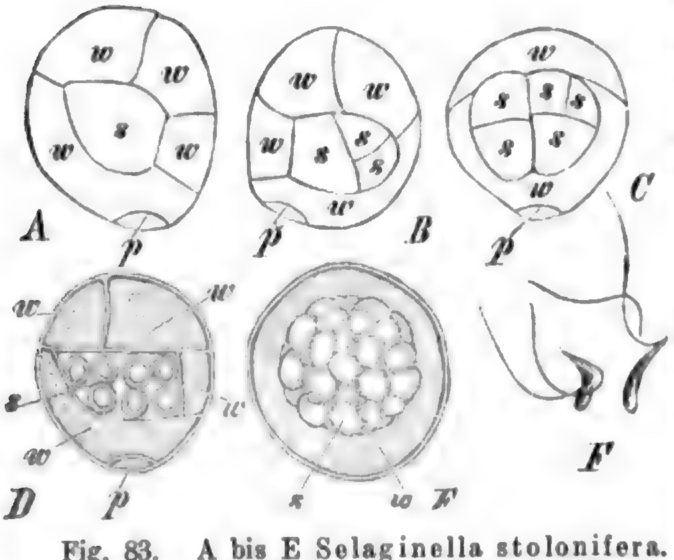


Fig. 83. A bis E Selaginella stolonifera. Keimung der Mikrosporen, sukzessive Stadien. p Prothalliumzelle, als Rhizoidzelle aufzufassen, w Antheridiumwandzellen, s spermatogene Zellen. A, B, D von der Seite, C vom Rücken. In E die Prothalliumzelle nicht sichtbar, die Wandzellen aufgelöst, umgeben die Spermatozoidmutterzellen. Vergrößerung 640fach. F Selaginella cuspidata, Spermatozoiden. Vergrößerung 780fach. Nach Belajeff. Aus Strasburgers Lehrbuch.

färbt, die Makrosporen sind von außen zu erkennen. Das Selaginellasporangium stimmt im allgemeinen mit dem von Lycopodium überein. Es wird gewöhnlich beschrieben als von der Oberfläche der Achse entspringend, jedoch die genaue Stellung variiert bei den einzelnen Species. Bis zur Bildung der zahlreichen Sporenmutterzellen verläuft die Entwickelung der Sporangien gleichförmig. In den Mikrosporangien gehen dann alle Sporenmutterzellen die Tetradenteilung ein und die zahlreichen Mikrosporen bleiben klein; in den Makrosporangien jedoch gehen in der Regel alle Sporenmutterzellen zugrunde bis auf eine, die eine Tetrade bildet. Die Makrosporen werden sehr groß, behalten aber die tetraedrische Gestalt bei. Ihre Zahl ist gewöhnlich 4, es sind aber auch schon 12 gesehen worden bei Selaginella Vogelii, die natürlich von drei Sporenmutterzellen abstammen, andererseits kann manchmal auch nur eine einzige vorhanden sein. Die Ausstreuung der Sporen erfolgt in derselben Weise wie bei Lycopodium, doch sind die mechanischen Vorrichtungen schärfer ausgebildet, besonders für die Makrosporen.

Digitized by Google

Die Sporen können schon zu keimen anfangen, ehe sie ausgestreut sind; die Keimung geht dann auf dem Boden weiter, wobei sie oft nebeneinander zu liegen kommen. Bei der Keimung der Mikrosporen wird zuerst eine kleine Prothalliumzelle abgeschnitten (Fig. 83, p), der ganze übrige Inhalt der Spore entwickelt sich zum Antheridium, das schließlich zahlreiche Spermatozoiden mit 2 Cilien entläßt (Fig. 83, F). Das männliche Prothallium ist also sehr reduziert, vergleichbar mit dem der Hydropterideae. Die tetraedrischen Megasporen sind von einer dicken Wand umgeben, welche längs der 3 konvergenten Linien aufbricht, so daß der Inhalt freigelegt wird. Es wird Selaginella spinulosa genau erforscht worden. Die ersten Stadien sind im wesentlichen wie bei Lycopodium: der Embryo steckt mit einem Suspensor im Prothallium; aus der unteren Zelletage (vgl. Fig. 80, I) entsteht das Hypocotyl, die obere bildet die Cotyledonen und den Stammscheitel. An der Basis, in engem Zusammenhang mit dem Suspensor, entsteht die erste Wurzel. Das Hypocotyl streckt sich, so daß der Embryo sich krümmt und die Achse die Vertikalstellung annimmt (Fig. 84, 5).

Hinsichtlich der Entstehung und Lage der Teile des Embryo sind bei den verschiedenen Formen des Genus Unterschiede vorhanden. Sie alle stimmen darin überein, daß

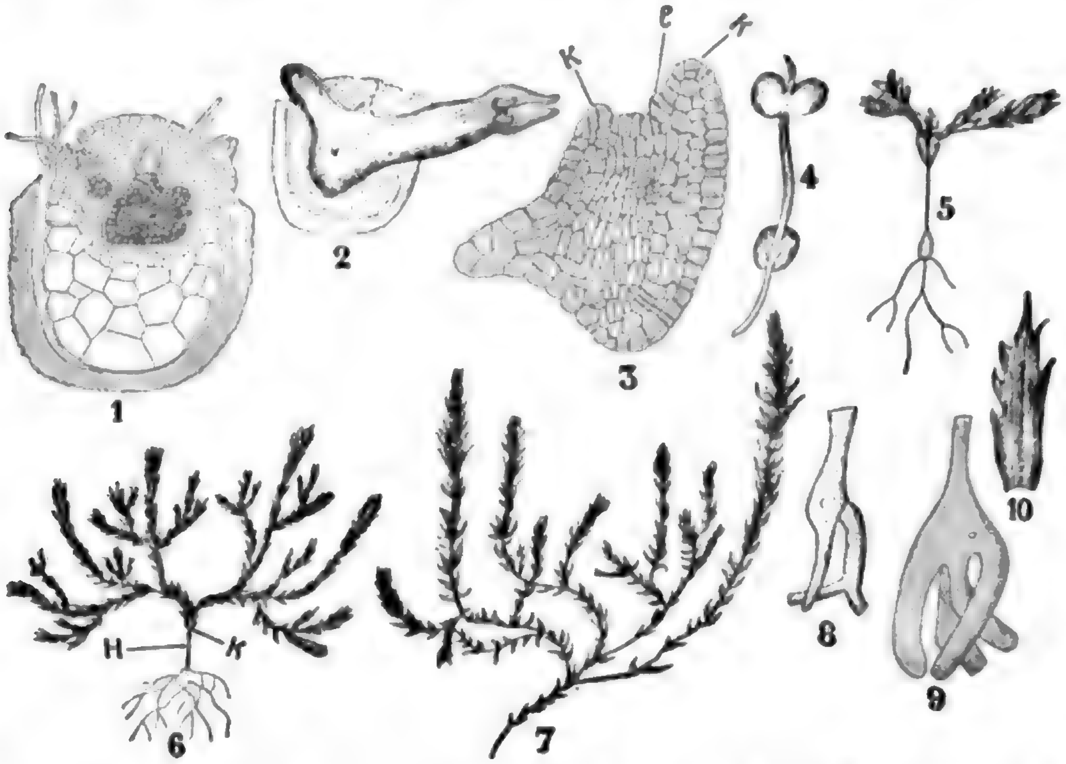


Fig. 84. Selaginella Martensii. 1 Gekeimte Megaspore mit zwei Embryonen. 2 Dasselbe, der Embryo hervortretend. Nach Pfeffer. 3 bis 10 Selaginella selaginoides, 3 Embryo in Längsschnitt, links unten der Embryokörper, rechts unten die Stelle, wo die Wurzel entstehen wird. K die ersten Keimblätter, l die Ligula. 4 Junge Keimpflanze mit Wurzel. Hypokotyle, Kotyledonen und Plumula. 5 Etwas älteres Stadium der Stengel, unten verdickt, darüber das dünne ausdauernde Hypokotyl. 6 Aelteres Stadium. H Hypokotyl, K die beiden Kotyledonen. 7 Habitusbild eir Endverzweigung mit drei Strobili. 8 und 9 Der Stammgrund einer jüngeren und einer älteren Pflanze. 10 Laubblatt. Nach Bruchmann.

nun vom Scheite der Spore ab ein Prothallium gebildet, so daß der ganze Hohlraum mit einem großzelligen Gewebe angefüllt wird, das durch die Oeffnung in der Wand hervorragt. Auf der hervorragenden Fläche entstehen die Archegonien (Fig. 84, 1), worauf die Befruchtung erfolgt. Auch hier ist also das Prothallium reduziert, jedoch nicht in dem Maße, wie das männliche, da ja für den jungen Embryo ein gewisser Vorrat von Nahrungsstoffen vorhanden sein muß. Die Embryologie ist von Bruchmann für der Stammscheitel von der Mitte der epibasalen Etage entsteht. Große Verschiedenheiten zeigt die Entwickelung des haustoriumartigen Fußes. Bei dem primitiven S. spinulosa fehlt er gänzlich; bei Selaginella Martensii (Fig. 84, 2) erscheint er als eine Anschwellung, welche die junge Pflanze mit dem Prothallium verbindet, nachdem der Sproß hervorgewachsen ist.

Selaginella ist wahrscheinlich ein alter Typus. Kleine Organismen, im Habitus den heterophyllen Selaginellen gl ichend, exi-

Digitized by Google

stierten zu geologisch früher Zeit. Lycopodites Gutbieri Gopp. aus den oberen Kohlenschichten kann kaum etwas anderes gewesen sein. Ferner hat Lycopodites primaevus Schr., aus den mittleren Kohleschichten, heterospore Sporangien, mit mehr als 4 Sporen in den Megasporangien, wenn auch keinen deutlichen Selaginellasproß. Auch bei Lycopodites Suissei kann die Zahl der Megasporen 16 bis 24 sein. In diesen Fällen scheint die Reduktion der Sporenzahl, die im Gefolge der Heterosporie auftritt, noch nicht soweit gegangen zu sein, als bei der modernen Selaginella. Dann aber finden sich im Karbon Fossilien, wie Miadesmia, welche in der Struktur, in den heterophyllen Blättern und im Besitz einer Ligula mit Selaginella übereinstimmen, in ihrer Fruktifikation jedoch eine Fortentwickelung zu den Samenpflanzen hin zeigen. Die einzige Makrospore, die gebildet wird, bleibt im Sporangium, das von einem Integument mit einer kreisförmigen Mikropyle umgeben ist (Fig. 85).

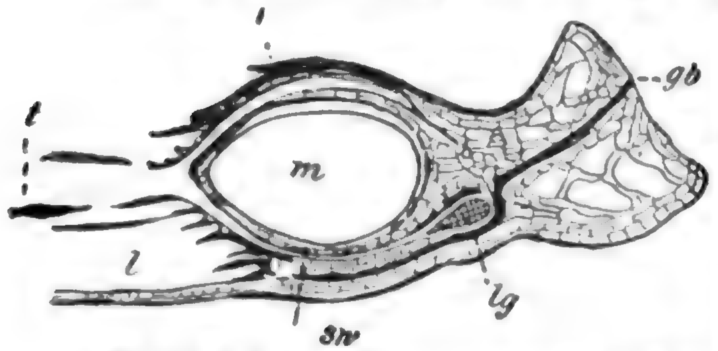


Fig. 85. Miadesmia membranacea. Radialschnitt des samenartigen Organs. t Tentakeln. Nach Scott.

Selaginella, so wie wir es lebend kennen, scheint also eine sehr interessante Mittelstellung zwischen den bekannten Formen einzunehmen. Der radiäre Typus des Genus ist offenbar der primitive. Die Gleichheit der ersten Entwickelungsstadien der beiden Sporangiumtypen macht die Abstammung von homosporen Formen wahrscheinlich, doch sagen uns die Fossilien, daß der Typus mindestens aus dem Karbon stammt, ja daß er zu jener Zeit schon eine Fortentwickelung zu Samenpflanzen hin zeigte. Bis jetzt läßt sich aber keine Gruppe der Samenpflanzen auf derartige Stammformen zurückführen.

Das Genus Isoetes kann als ein lebender Vertreter der baumförmigen Lycopodiales aus der paläozoischen Periode betrachtet werden, der von gestauchtem Habitus und in seinem Vorkommen beschränkt ist. Es umfaßt über 60 Species, die besonders in den gemäßigten Zonen weit verbreitet sind. 2 Species sind Landbewohner, die übrigen leben untergetaucht in frischem Wasser und wurzeln im Schlamm. Die Isoetespflanze besteht aus einer kurzen aufrechten Achse, die bedeckt ist von relativ großen Blättern. Die Achse ist gewöhnlich unverzweigt, jedoch kann Gabelung gelegentlich vorkommen, eine Tatsache, die interessant ist im Vergleich mit den Lycopodien (Fig. 86).

Die Blätter sind alle gleich, ihre Basis ist breit, der obere Teil borstenförmig; in einiger Entfernung von der Basis befindet sich eine kleine Grube, in der die Ligula sitzt. Es sind sterile und fertile Blätter vorhanden, bei einigen Species besteht ein Größenunterschied, indem die sterilen Blätter kleiner sind. Die Pflanze ist heterospor. Bei den fertilen Blättern liegt das Sporangium in einer Vertiefung der Blattoberfläche, zwischen Ligula und Blattbasis; obwohl das Sporangium groß, kuchenförmig ist, stimmt also seine Lage doch mit der bei Selaginella überein. Die Untersuchung von Schnitten durch die Blätter ergibt, daß auch bei der Mehrheit der sterilen Blätter ein rudimentäres Sporangium in normaler Lage vorhanden ist. Man hat festgestellt, daß in jeder Vegetationsperiode eine regelmäßige Aufeinanderfolge von Makrosporophyllen, Mikrosporophyllen und sterilen Blättern stattfindet. Das ist ein Zustand, wie er ähnlich bei Lycopodium Selago anzutreffen ist. Nachdem die Embryonalstadien durchlaufen sind, stellt die ganze Pflanze potentiell einen fertilen Strobilus dar, in welchem sterile und fertile Regionen nur unvollkommen voneinander differenziert sind. Hinsichtlich der Sporangien zeigt Isoetes gemeinsame Merkmale mit den baumförmigen Lycopodiales: bei beiden sind sie groß und kuchenförmig. Auch ist eine gewisse Aehnlichkeit mit diesen in der Struktur des verkürzten, massigen Stammes, sowie in der Lokalisation der gegabelten Wurzeln an dessen Basis zu erkennen. In der Tat ist Isoetes wie ein gestauchtes Lepidodendron oder mehr noch wie ein Lepidostrobus, der an der Basis eines Lepidodendrons ansitzt. Das macht seine Untersuchung interessant und wichtig.

Es ist schwierig, die komplizierte Gewebsmasse des Stammes zu entziffern, da infolge der Lebensweise im Wasser eine Reduktion eingetreten ist. Die Stele der Achse wird am besten gedeutet als ein Stammgebilde, vergleichbar mit dem der einfacheren Lycopodien; von ihr gehen dicht gedrängt die Blattspuren ab. Das Xylem ist reduziert und parenchymatisch. Eine kambiale Tätigkeit beginnt frühzeitig, sie bildet die Fortsetzung der Tätigkeit der primären Meristeme. Das Kambium erzeugt nach außen hin Rindenparenchym, nach innen hauptsächlich Xylem mit viel Parenchym. Es ist zweifelhaft, ob überhaupt sekundäres Phloem ge-

Digitized by Google

bildet wird. Die Struktur ist so, wie sie bei einem gestauchten Lycopoden zu erwarten war, etwa vom Typus des Lepidodendron fuliginosum, wenn derselbe den Wasserhabitus annahm. Die monarchen, dichotomen Wurzeln stimmen genau mit denen von Stigmaria überein, auch zeigt ihre Anordnung gewisse Analogien mit der bei Stigmaria (s. unten). Die Anatomie von Isoetes stützt also den Vergleich mit Lepidodendron.

Das gilt auch für die Lage und den Bau der Sporangien. Die Pflanze ist heterospor wie die übrigen Ligulaten; aber aus der Aehnlichkeit der ersten Stadien beider Arten von Sproangien ergibt sich unzweifelhaft, daß verläuft genau so, so daß eine Beschreibung hier überflüssig ist. Dagegen unterscheiden sie sich in den Spermatozoiden, die bei Isoetes viele Cilien tragen, sich also mit denen der Filicales vergleichen lassen. Auch hat der Embryo keinen Suspensor. Die Embryologie ist im Vergleich mit der der Lycopodiales abgekürzt, der Stammscheitel in seinem Wachstum gehemmt durch die frühzeitige Entstehung des Cotyledos und der ersten Wurzel aus der epibasalen Etage. Aus der hypobasalen Etage geht nur der Fuß hervor. Da also auch Isoetes im wesentlichen mit dem übereinstimmt, was bei Lycopodium und Selaginella zu sehen ist, so können alle Lycopodiales als Varianten eines ein-

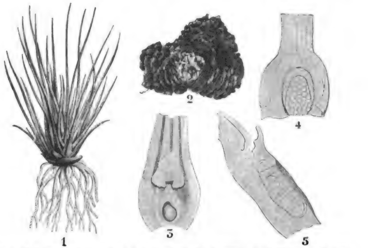


Fig. 86. 1 bis 3 Isoetes lacustris. 4 I. Bolanderi. 5 I. lacustris. 1 Habitusbild. 2 Dreilappiger Stamm, von oben gesehen, nach Entfernung der Blätter. 3 Basis des fruktifizierenden Blattes von der Innenseite. 4 Blattbasis mit Makrosporangium. 5 Längsschnitt des basalen Teils eines Sporophylls mit seinem Mikrosporangium. 1 und 3 nach Luerssen. 2 nach Lotsy. 4 nach Campbell. 5 nach Hofmeister.

sie gleicher Herkunft sind. Am interessantesten ist dabei, daß die sporogene Masse quer durchsetzt wird von Trabeculae aus sterilem Gewebe, die von der Basis des Sporangiums bis zur äußeren Wand desselben sich erstrecken; dadurch wird dieses mechanisch gestützt und seine Ernährung wird erleichtert. Aehnliches findet sich bei einigen der größeren Lepidodendronsporangien. Die Sporen werden frei infolge der Verwesung der Sporangiumwand; sie sehen aus wie die von Selaginella. Die Zahl der Makrosporen in einem Sporangium ist jedoch viel größer als dort. Auch die Keimung zigen Typus angesehen werden, der im Grunde spindelförmig ist und dessen Stammscheitel aus der Mitte der epibasalen Etage hervorgeht.

Wir gehen nun zu den baumförmigen Lycopodiales über. Sie gehören zu den ältesten Fossilien und finden sich vom Devon bis zur Trias. Dazu gehören die Lepidodendraceae, Bothrodendraceae, Sigillariaceae und Pleuromoiaceae. Dieselben unterscheiden sich in Einzelheiten, nach denen die Einteilung getroffen ist, allen aber liegt der gleiche morphologische Bauplan zugrunde. Die Hauptzüge desselben sind folgende: Die

Digitized by Google

Hauptachse war aufrecht, sie erreichte in manchen Fällen eine Höhe von 100 Fuß. Sie war umfangreich im Vergleich mit den zahlreichen einfachen Blättern, welche sie trug.

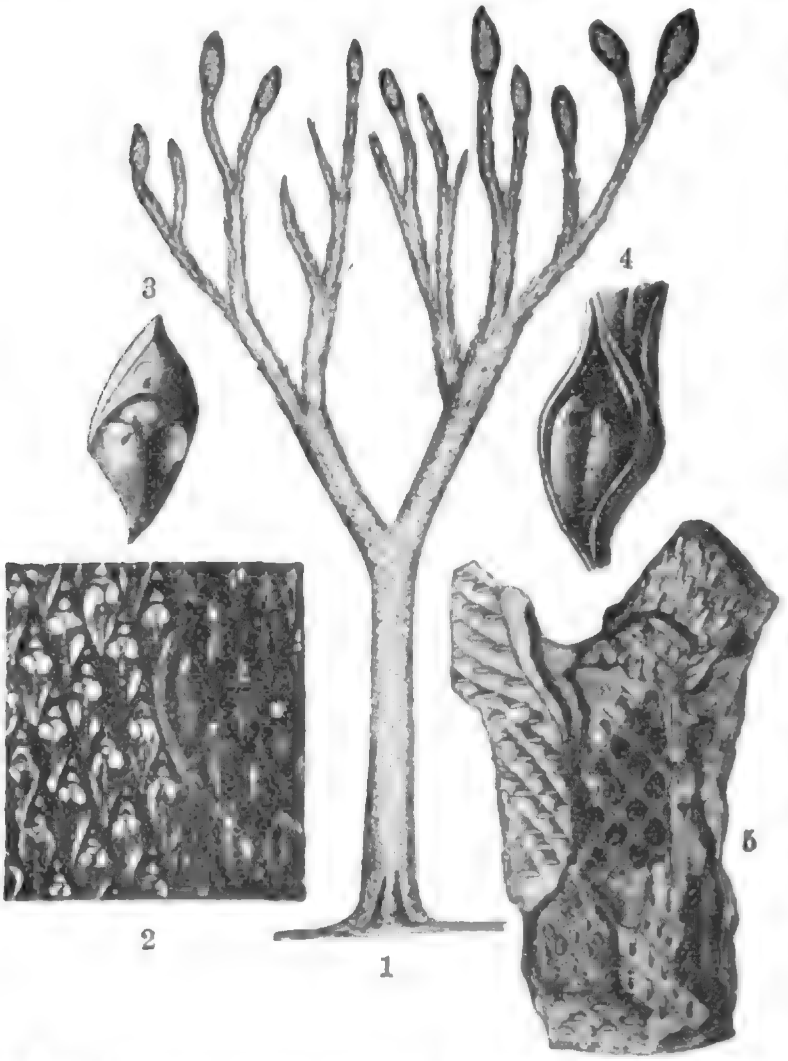


Fig. 87. 1 Lepidodendronbaum. Restauriert. Nach Potonié. 2 Lepidodendron aculeatum. Fragment des Stengels und Hohldruck. Nach Sternberg. 3 und 4 Lepidodendron, Blattpolster. Nach Potonié. 5 Lepidodendron, verschiedene Erhaltungszustände zeigend. Nach Seward.

Nach oben hin war sie dichotom verzweigt, in den meisten Fällen überreich (Fig. 87, 1).

Bei einigen Sigillarien jedoch und bei Pleuromoia fehlte die Verzweigung gänzlich. Die Achse war im Boden befestigt durch wenig tief eindringende, weit ausgebreitete Stigmarien (Fig. 88). Bei Lepidodendron waren es vier Hauptstigmarien, die sich wiederholt gabelten und so ein weit ausgebreitetes System bildeten. Von diesen rhizomartigen Organen strahlten Würzelchen nach allen Seiten aus, die eine Länge von 1 Fuß und mehr erreichten und sich dichotom verzweigten (Fig. 88, 4). Das gemeine Fossil Stigmaria zeigt gewöhnlich nur noch die Narben an den Stellen, wo die Würzelchen ausgingen (Fig. 88, 3). In ihrem monarchen Bau und der dichotomen Verzweigung stimmen diese Würzelchen genau mit denen von Isoetes überein (Fig. 88, 6 bis 9). Die noch unvollkommen bekannte Form Pleuromoia ist für den Vergleich besonders interessant (Fig. 89). Sie hat stammartige Stigmarienstümpfe, die verkürzt, aber noch mit den Wurzelnarben bedeckt sind. Denkt man sich dieselben noch weiter reduziert, so daß sie schließlich statt konvex konkav werden, so erhalten wir eine ungefähre Vorstellung des Zustandes von Isoetes.

Die Blätter der fossilen Lycopodiales waren manchmal von beträchtlicher Größe, jedoch einfach gestaltet. Sie waren an der Basis zu den wohlbekannten Polstern verbreitert, die bei manchen Formen die ganze Außenseite des Stammes bedecken (Fig. 87, 3, 4). An der Oberseite der Blätter, nahe der Basis, saß die Ligula, oft in einer tiefen Grube. Die Sporangien waren in der Regel auf wohlumschriebene Zapfen beschränkt, die als Lepidostrobus beschrieben worden sind. Deren Bau war im wesentlichen derselbe, wie der des vegetativen Sprosses, von dem Vorhandensein der Sporangien abgesehen. Die Sporangien waren sehr groß und von der Achse radial nach außen gestreckt. Bei Lepidodendron standen diese Zapfen am Ende gewöhnlicher Zweige; bei Sigillaria entsprangen sie seitlich an der Hauptsache, von der sie bei der Reife abfielen. Bei Pleuromoia scheint, wie bei Isoetes, die ganze Hauptachse ein Strobilus gewesen zu sein, der auf einer Stigmarienbasis saß.

Die alten Lepidodendrontypen stimmen mit den modernen Lycopodiales nicht nur in der äußeren Form, sondern auch in dem inneren Bau überein; jedoch im Zusammenhang mit den größeren Dimensionen der Fossilien erscheinen bei diesen spezielle Umwandlungen, die bei den modernen Formen fehlen. Die Uebereinstimmung besteht in dem Vorhandensein einer einzigen Stele mit zentripetalem Holz und peripherem Protoxylem; an dieser sind die Blattspuren mit dem Minimum lokaler Störung inseriert. Bei einigen der ältesten Species, deren Struktur erhalten ist, bestand der Xylemkern durchweg aus Holz (Protostele); bei

Digitized by Google

jüngeren Typen war er differenziert und hatte ein zentrales Mark. Eine auffallende Begleiterscheinung des starken Wuchses war das sekundäre Dickenwachstum, das bei der Mehrzahl der bekannten Formen zu erkennen ist. Dieses ging von zwei verschiedenen Kambien aus; das eine umgab das primäre Xylem und erzeugte einen Ring sekundären Holzes; das andere lag in der Rinde, unterhalb der zurückbleibenden Blattbasen, aus ihm ging ein breiter Ring sekundärer Rinde oder ein Periderm hervor, dessen Funktion zweifelhaft ist. Wie groß auch das Mark wurde im Verhältnis zum primären Holz, so blieb doch bei Lepidodendron der Zusammenhang des Ringes ununterbrochen. Bei Sigillaria jedoch, dessen Blätter bisweilen sehr groß wurden, war die Sache anders. Hier finden sich Entwickelungsstufen im Sinne einer Aufteilung des primären Holzes der markhaltigen Stele in getrennte Stränge. So haben sich also die jüngsten Sigillarien am weitesten von der primitiven Protostele entfernt, denn sie zeigen nicht nur ein Mark und sekundäres Dickenwachstum, sondern auch die Aufteilung des primären Xylems. Trotz alledem ist es aber doch möglich, zu erkennen, daß die Gefäßbündel der fossilen Lycopodiales Umwandlungen der primitiven Protostele darstellen.

Der Lepidostrobuszapfen war oft von beträchtlicher Größe. Die Sporophylle waren so gestaltet und überdeckten einander so, daß die jungen Sporangien vollkommen geschützt waren. Es wurden Makro- und Mikrosporen gebildet, häufig im gleichen Zapfen (Fig. 90, 2). Die Mikrosporen sahen aus wie die von Selaginella. Die Makrosporen, von denen eine viel größere Zahl in jedem Sporangium entstand als bei Selaginella, waren auf der Außenseite mit verschieden gestalteten Vorsprüngen versehen. Das Prothallium bleibt in ihnen eingeschlossen, man hat sogar Reste von Archegonien erkennen können. Ohne Zweifel waren die Methoden der Fortpflanzung bei diesen Fossilien im wesentlichen die gleichen wie bei den lebenden Ligulaten. Doch zeigten einige dieser Pflanzen Anfänge einer Samenbildung. Miadesmia ist schon erwähnt worden. Ein weiteres Beispiel dafür ist Lepidocarpon, bei dem, mit Unterschieden in Einzelheiten, die Megaspore in ähnlicher Weise auf der Elterpflanze zurückgehalten wurde, wozu noch die schützende Umhüllung des Sporangiums durch integumentartige Gebilde kam, so daß ein Körper entstand, der einem Samen sehr nahe kommt. Mög-

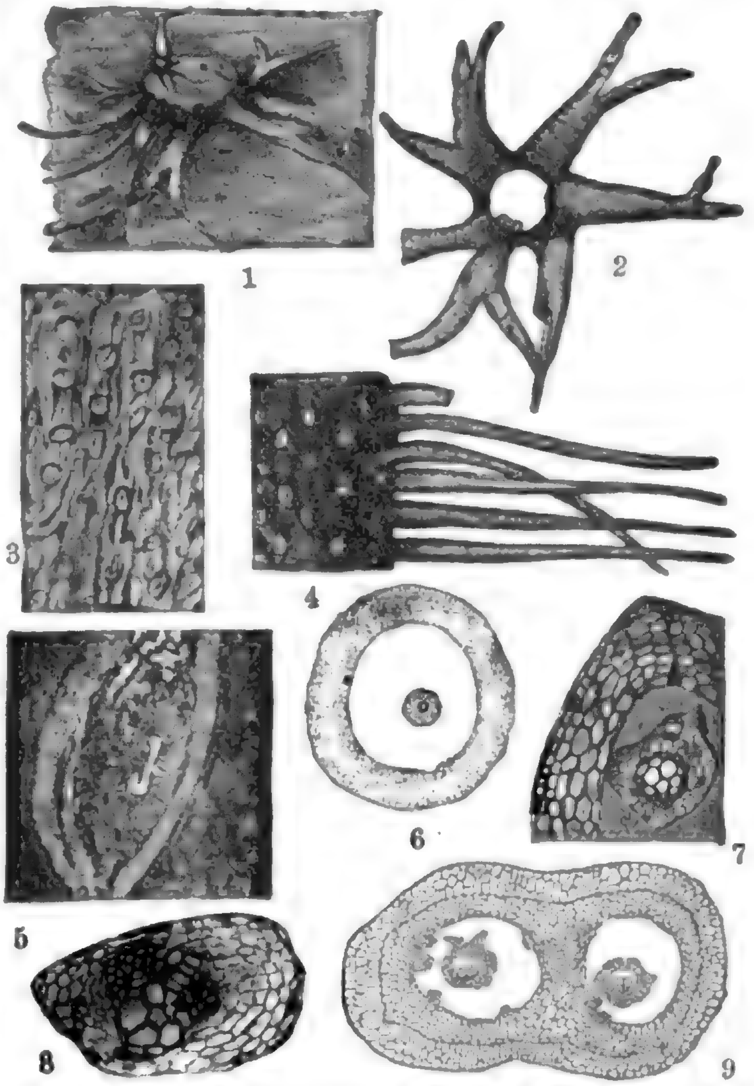


Fig. 88. Stigmaria ficoides. 1 Habitus. Nach Williamson. 2 Dasselbe. Nach Potonié. 3 Oberfläche, mit Narben der Appendices. 4 Stück mit Appendices. Nach Potonié. 5 Querschnitt eines kleinen Exemplars. Nach Scott. 6 Querschnitt eines Würzelchens, so wie es gewöhnlich erhalten ist, außen ein Teil der äußeren Rinde, innen das Xylem, von der inneren Rinde umgeben. Nach Scott. 7 Teil eines Querschnittes eines Würzelchens, die monarche Struktur zeigend. Nach Scott. 8 Querschnitt des zentralen Teiles eines Würzelchens, ganz unten links das Protoxylem, dann das sehr weitzellige Metaxylem, ganz oben das sekundäre Xylem. 9 Querschnitt eines sich gabelnden Würzelchens, die in zwei Zonen differenzierte äußere Rinde noch zusammenhängend, die innere Rinde der beiden Zweige schon vollständig geteilt.

Digitized by Google

licherweise gewannen die Mikrosporen Zutritt zu ihnen, solange sie noch auf der Elterpflanze sich befanden. Jedoch es ist kein Beweismaterial vorhanden, das uns ein weiteres Fortschreiten auf dieser Entwickelungslinie zeigte, so daß daraus sich irgendeiner der bekannten Stämme der Samenpflanzen ergeben hätte.

Die Lycopodiales stellen also im ganzen genommen eine sehr natürlich zusammenhängende Pflanzenreihe dar. Sie unterscheiden sich von allen anderen. Sie gehören mit zu den ältesten Typen, die man kennt.

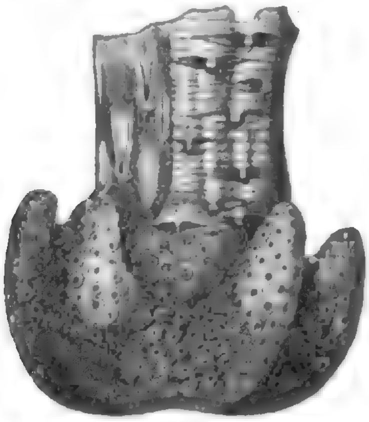


Fig. 89. Pleuromeia Sternbergi. Stammknolle mit Wurzelnarben und einem Stück des oberirdischen Stammteils, der rechts die epidermale Oberfläche mit Blattnarben, links die subepidermale Struktur zeigt. Nach Bischof.

Ihre Aufeinanderfolge in den geologischen Schichten ist in vieler Hinsicht dieselbe, wie sie sich aus der vergleichenden Untersuchung der verschiedenen Formen ergibt. Aus beiden Quellen können wir schließen, daß der primitive Typus einen undifferenzierten Sproß darstellte, der zugleich vegetativ und fertil war, der sich dichotom verzweigte, eine protostele Achse hatte und homospor war. Dieser primitiven Urform steht von den heutigen Vertretern am nächsten der Selagotypus von Lycopodium. Aber, wie Scott hervorhebt (Studies, p. 266): „alle paläozoischen Lycopoden, deren Reproduktion bekannt ist, waren heterospor."

4. Spenophyllales.

Dazu gehörte ursprünglich die längst ausgestorbene Pflanzenfamilie der Sphenophylleae. Hier sind außerdem dazu genommen die lebenden Psilotaceae, mit den Genera Psilotum und Tmesipteris, die von einigen anderen Forschern nicht zu dieser Gruppe gestellt werden. Ferner werden hier einige noch nicht vollständig bekannte Fossilien am besten untergebracht. Diese Pflanzen haben eine dominierende Achse von protostelem Bau, welche Blätter von mäßiger Größe trägt; letztere sind mehr oder weniger stark gabelig verzweigt, sie stehen in Wirteln (Sphenophylleae) oder

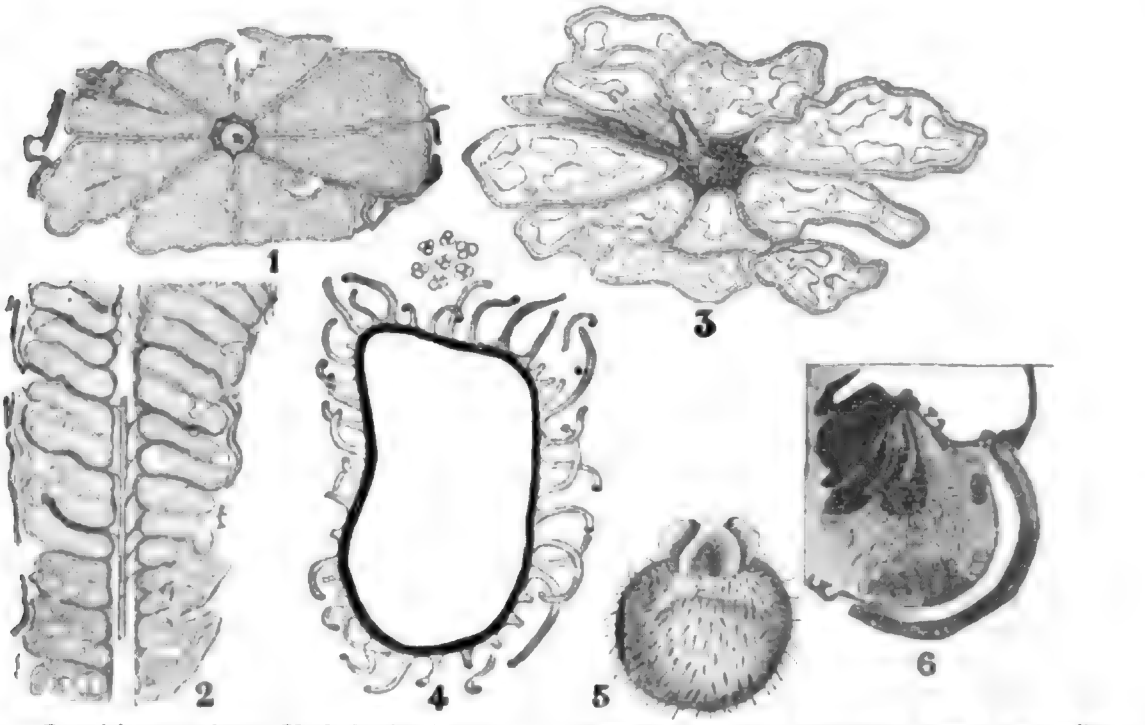


Fig. 90. Lepidostrobus Veltheimianus. 1 Querschnitt des Strobilus durch den mikrosporangialen Teil. 2 Längsschnitt des Strobilus, oben die Mikro-, unten die Makrosporangien. 3 Querschnitt des Strobilus durch den megasporangialen Teil. 4 Querschnitt der Megasporenwand, oben eine Gruppe von Mikrosporentetraden, in derselben Vergrößerung gezeichnet. 5 Vermutlich infolge der Keimung aufgesprungene Megaspore. 6 Prothallium mit Archegonialhöhle. 1 bis 5 nach Scott, Kidston und Binney. 6 nach Renault.

Digitized by Google

alternierend (Psilotaceae). Ein wichtiges Unterscheidungsmerkmal ist, daß die Sporangiophoren nicht direkt der Achse ansitzen, sondern auf Anhangsgebilden: dadurch sind sie deutlich von den Equisetales abgegrenzt, mit denen sie im übrigen sehr viel Gemeinsames haben. Letzteres gilt besonders für die Sphenophylleae, während die Psilotaceae mehr zu den Lycopodiales hinneigen. Das ganze Phylum nimmt so eine vermittelnde, vielleicht zentrale Stellung ein, die ihm besonderes Interesse verleiht.

A. Sphenophylleae. Diese alte und längst ausgestorbene Familie wird vertreten durch das eine Genus Sphenophyllum; mit ihm vergesellschaftet ist der komplizierte Strobilus, der unter dem Namen Cheirostrobus bekannt ist. Sie finden sich in den Schichten des „Calciferous Sandstone" bis zum Perm. Die sporenerzeugenden Teile der Pflanze waren gewöhnlich zu wohlumschriebenen, terminalen Strobili vereinigt, aber die Abgrenzung war nicht immer deutlich. Das vegetative System von Sphenophyllum bestand aus einer schlanken Achse mit gerippten Internodien; die Internodien waren getrennt durch superponierte Wirtel von Blättern, die unten mehr oder weniger verwachsen waren. Die Sproßzweige standen einzeln und augenscheinlich axillar. Die Zahl der Blätter in einem Wirtel war ein Vielfaches von 3, sehr häufig waren es 6. Sie waren keilförmig, mehr oder weniger gabelig geadert mit verschieden tiefen Einschnitten zwischen den Gabelenden. Die ältesten Formen hatten schmale, lineare Blätter, die jüngeren breit keilförmige und manche waren heterophyll (Fig. 91). Die Pflanze war im Boden befestigt durch Wurzeln, die offensichtlich an den Knoten inseriert waren.

Der innere Bau ist verschieden; sekundäres Dickenwachstum ist deutlich zu sehen und begann frühzeitig, so daß der primäre Zustand nur in kleinen Zweigen erhalten ist. Die Achse war protostel ohne jedes Mark oder verbindendes Parenchym. Das primäre Xylem hat Dreiecksform, die Protoxylemgruppen, einfach oder doppelt, liegen an den vorspringenden Ecken. Die Leitbündel sind Stammbündel; sie durchsetzen die Knoten ohne bemerkenswerte Veränderung des Baues. Bei der alten Species Sphenophyllum insigne bildete sich an jeder der drei Ecken des primären Holzkörpers ein Kanal infolge der Disorganisation des Protoxylems, so wie bei den Equisetales (Fig. 92, 1). Die Tätigkeit des Kambiums beginnt unmittelbar an der Außenseite des primären Holzes; es erzeugt eine breite Zone sekundären Holzes, welche das primäre Holz vollständig umschließt. Nach außen vom Holz liegt das Phloem und die Rinde, letztere mit einem Periderm.

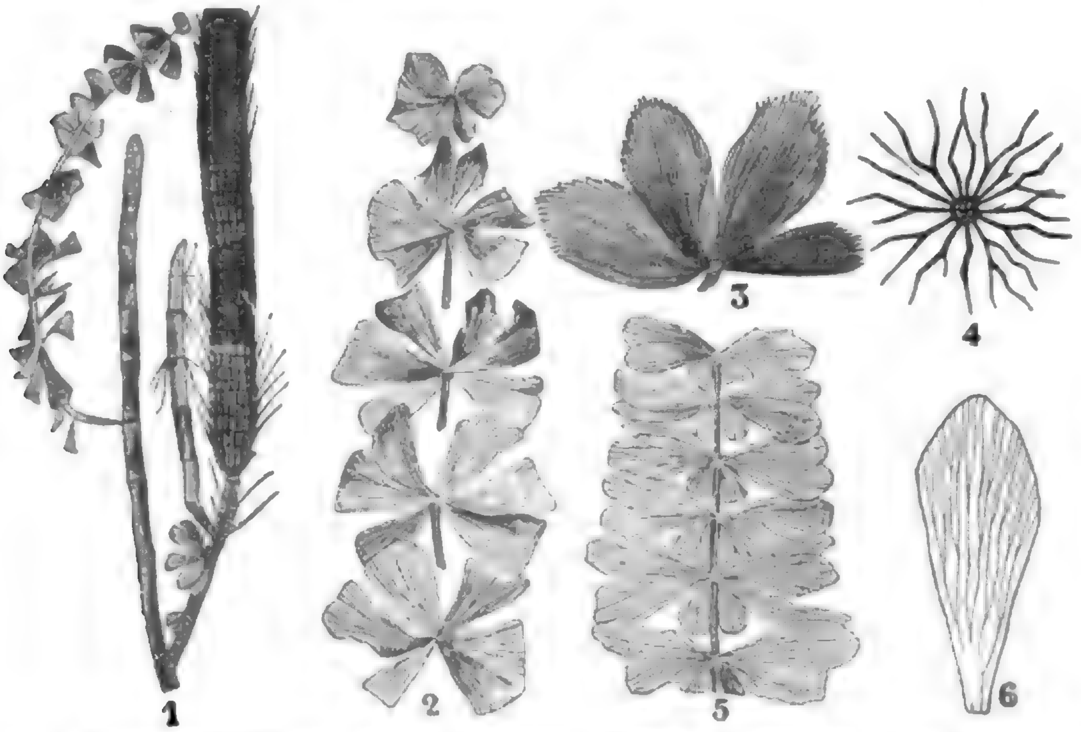


Fig. 91. 1 Sphenophyllum spec. Verzweigte Stengel, lineare und keilförmige wirtelige Blätter tragend, der rechte Zweig in einem langen Strobilus endend. Nach Scott. 2 S. emarginatum Brongn. Nach einem Exemplar aus der Sammlung Kidston. 3 S. Thonii Makr. 4 S. trichomatosum Stur. 5 S. speciosum Boyle. 6 Dasselbe. Ein Blatt, vergrößert. 2 und 4 nach Seward. 3 nach Zeiller. 5, 6 nach Feistmantel.

Digitized by Google

Die Blätter scheinen der Größe und dem Bau nach Assimilationsorgane gewesen zu sein, wogegen die Achse kaum assimilierte. Die an den Knoten austretenden Blattspuren verzweigten sich gewöhnlich innerhalb der Stammrinde in einzelne Stränge, die in die Adern des Blattes ausliefen unter wiederholter Gabelung (Fig. 91, 6).

Der Strobilus von Sphenophyllum war ähnlich gebaut wie der vegetative Sproß, nur daß die Sporangiophoren dazu kamen. Die Internodien desselben waren kürzer, die Blätter mehr verwachsen. Der Konus hatte so das Aussehen eines kompakten Körpers, der die bis zur Reife völlig geschützten Sporangiophoren trug. Jedoch die verschiedenen, unter dem generellen Namen Sphenophyllum beschriebenen Fossilien zeigen Unterschiede im einzelnen, sowohl hinsichtlich der Zahl und Lage der Sporangiophoren als auch der Zahl der von jedem derselben getragenen Sporangien. Die einfachsten Verhältnisse finden sich bei Sphenophyllum trichomatosum; hier stehen die Sporangien einzeln, nahe der Achsel der schmalen Sporophylle. Bei dem bekannten Sphenophyllum cuneifolium steht jedes Sporangium auf einem verlängerten vaskularen Sporangiophor; deren Zahl ist in jedem Wirtel doppelt so groß als die der verwachsenen Sporophylle. Komplizierter noch ist Sphenophyllum Roemeri, wo auf jedem Sporangiophor 2 Sporangien sitzen; letztere stehen in drei konzentrischen Kreisen an jedem Blattwirtel. Die Analogie mit den Sporangiophoren der Equisetales ist hier deutlicher als da, wo nur ein einziges Sporangium auf jedem derselben sitzt. Noch deutlicher ist sie bei Sphenophyllum majus aus den mittleren Kohleschichten (middle Coal Measures); der Strobilus ist hier nicht scharf abgegrenzt. In jedem Wirtel stehen 6 oder 8 schmale, verschieden verzweigte Blätter. An der Basis jedes der gegabelten Sporophylle steht ein Sporangiophor, der 4 bis 6, gewöhnlich 4 Sporangien trägt. Die Sporangien haben eine radiale Dehiszenzlinie; das Ganze sieht auffallend den Sporangiophoren von Psilotum gleich (s. unten). Bei Sphenophyllum fertile endlich ist sowohl der dorsale als der ventrale Lappen fertil, d. h. es sitzen Sporangien sowohl am Sporangiophor als an dem diesen tragenden Blatt (Fig. 93).

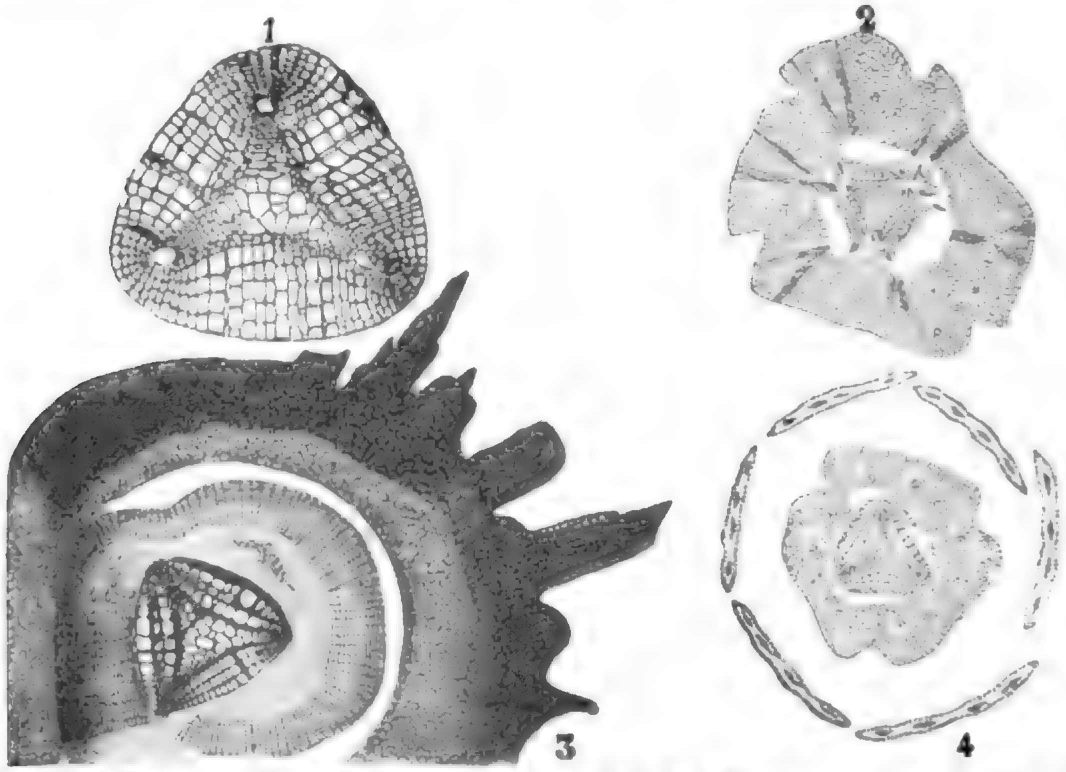


Fig 92. 1 Sphenophyllum insigne. Querschnitt des Holzteiles eines ziemlich jungen Stengels, das dreieckige primäre Holz zeigend, mit einem das Protoxylem markierenden Kanal an jeder Ecke, rund herum das sekundäre Holz. 3 Sphenophyllum plurifoliatum. Querschnitt durch ein beblättertes Nodium. Nach Williamson. 2 und 4 Sphenophyllum quadrifolium. 2 Querschnitt durch ein Nodium, die sich gabelnden Blattbündel zeigend. Nach Renault. 4 Querschnitt etwas oberhalb des Nodiums, welcher 6 Blätter getroffen hat. Nach Renault.

Schließlich bleibt noch der merkwürdige Zapfen aus dem „Calciferous Sandstone" von Burntisland; Scott hat ihn Cheirostrobus genannt und zu den Sphenophyllales in Beziehung gesetzt, doch hat er auch dessen Verwandtschaft mit den Equisetales und Lycopodiales erkannt. Sein vegetatives

Digitized by Google

System ist noch unbekannt. Der Zapfen ist größer und komplizierter als sonst einer der b kannten sporangiophoren Typen (Fig. 93 rechts). Seine kräftige Achse zeigt mehr Lycopodinen- als Sphenophylloidcharaktere. Der marklose Xylemkern war sternförmig mit 12 vorspringenden Protoxylemgruppen, entsprechend den superponierten Sporophyllwirteln. Jedes Sporophyll bestand aus 3 sterilen, handförmig geteilten Lappen und trug auf der Oberseite 3 Sporangiophoren, jeder mit 4 hängenden, langen Sporangien, angeheftet am verbreiterten distalen Ende (Fig. 93, rechts 2). Soweit sich aus dem Gefäßbündelverlauf schließen läßt, sind die Sporangiophoren Anhängsel des Sporophylls.

treter dieser eigentümlichen und etwas isolierten Familie. Sie werden gewöhnlich zu den Lycopodiales gestellt; jedoch seit man sie genauer kennt, scheint es natürlicher, sie mit den Sphenophylleae zusammen zu nehmen. Die beiden lebenden Genera sind in ihren allgemeinen Charakteren einander so gleich, daß kein Zweifel an ihrer nahen Verwandtschaft bestehen kann. Beide haben keine Wurzeln. Der grüne staudige Sproß haftet in dem Substrat, das gewöhnlich Humus ist, mit einem Komplex von blattlosen Rhizomen, die mit Rhizoiden bedeckt und von einer Mycorrhiza durchsetzt sind. Die Ernährung scheint also gemischt zu sein, teils saprophytisch, teils photo-

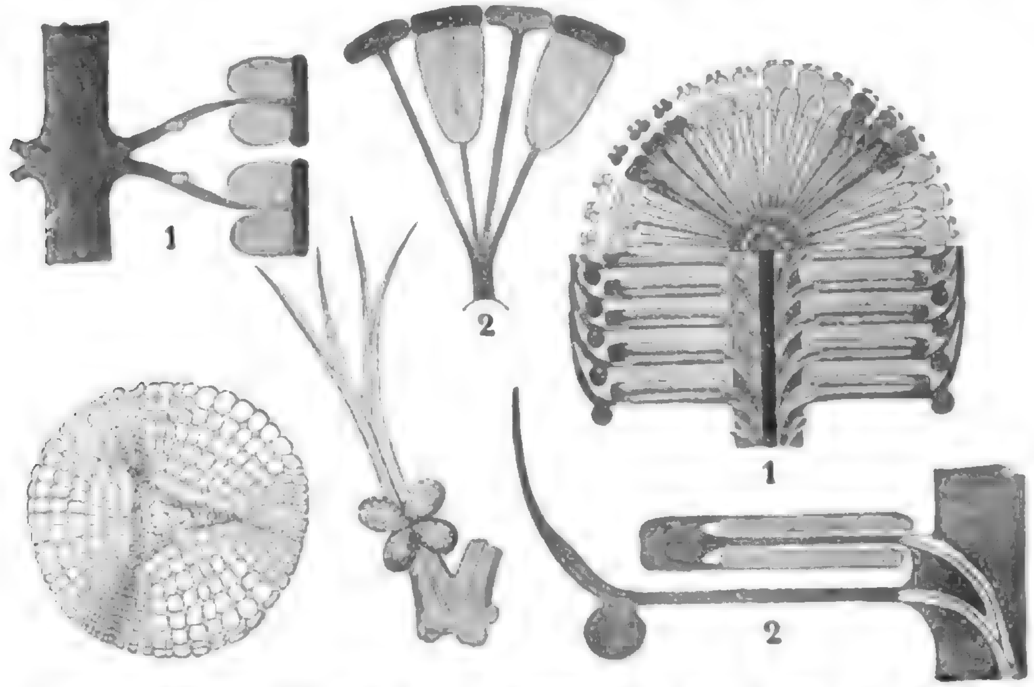


Fig. 93. Unten: Sphenophyllum spec. Querschnitt eines Stengels mit Dickenwachstum. Nach Zeiller. Oben: Sphenophyllum fertile Scott. 1 Längsschnitt, 2 Querschnitt eines Teiles des Strobilus. In der Mitte unten: Sphenophyllum majus Kidston, Sporophyll von der adaxialen Seite gesehen. Rechts: Cheirostrobus Pettycurensis Scott. 1 Diagramm des Strobilus. 2 Diagramm eines Längsschnittes des Sporophylls. Sämtlich nach Scott.

In diesem Zusammenhang sei auch Pseudobornia ursina genannt aus dem oberen Devon. Es hatte große, im Quirl stehende Blätter; seine Fruktifikation hatte die Form einer langen lockeren Aehre, welche wirtelige Sporophylle trug, die reduzierten vegetativen Blättern gleichsahen. Es scheint das, sagt Scott, ein Vertreter jener alten synthetischen Pflanzenrasse zu sein, von der bis dahin die Sphenophyllales die einzigen Beispiele waren. Derartige Fossilien lassen auf eine engere Verwandtschaft zwischen den mikrophyllen Typen in der Vergangenheit schließen, als sie deren lebende Vertreter erkennen lassen.

B. Psilotaceae. Die Genera Tmesipteris und Psilotum sind die einzigen lebenden Ver-

synthetisch. Die Luftsprosse tragen zweierlei Anhangsgebilde: einmal einfache Laubblätter und dann gegabelte Sporophylle. Diese können unregelmäßig auf demselben Sproß zusammenstehen, der so den Charakter eines lockeren, undifferenzierten Strobilus erhält.

Tmesipteris hat nur eine Spezies in Australien. Diese Pflanze wächst auf Stämmen von Baumfarnen; ihre blattlosen, dichotom verzweigten Rhizome sind in der Masse von Wurzeln versteckt, welche jene Stämme bedecken (Fig. 94, 1). Davon gehen Zweige ab, die sich dem Lichte zuwenden und die oben erwähnten Anhangsgebilde tragen. Die Laubblätter sind etwa einen halben Zoll lang, in einer Vertikalebene aus-

Digitized by Google

gebreitet. Die Sporophylle haben dieselbe Form, doch sind sie gegabelt, die Sporangiophoren sitzen zwischen den Lappen (Fig. 94, 3 bis 7). Jedes Sporangiophor trägt 2 große, zusammengewachsene Sporangien, manchmal auch 3 oder auch nur eines. Laubblätter und Sporophylle stehen in alternierenden Zonen; aber die Laubblätter können unregelmäßig zwischen den Sporophyllen verteilt stehen, sodaß kein abgegrenzter Strobilus da ist.

Das Genus Psilotum umfaßt zwei Species: Psilotum triquetrum und Psilotum flaccidum, ersteres eine aufrechte Staude, letzteres hängend und abgeflacht. Beide können epiphytisch leben und wachsen dann in mit Sphenophyllum majus (Fig. 93) ist unverkennbar. Die Stellung der Sporangiophoren in bezug auf die gegabelten Sporophylle ist die gleiche; in beiden Fällen ist die Zahl der Sporangien variabel, die Beziehung zwischen den einzelnen Sporangien und ihre Dehiszenz dieselbe. Die Sporophylle sind verschiedentlich gedeutet worden. Das einfachste und wahrscheinlichste ist jedoch, den Vergleich mit Sphenophyllum majus anzunehmen und sie als gegabelte Blätter anzusehen, von denen jedes ein Sporangiophor trägt.

Bei beiden Genera ist die Achse von einer Stele durchsetzt, die im Grund vom protostelen Typus ist; sie ist begrenzt von einer

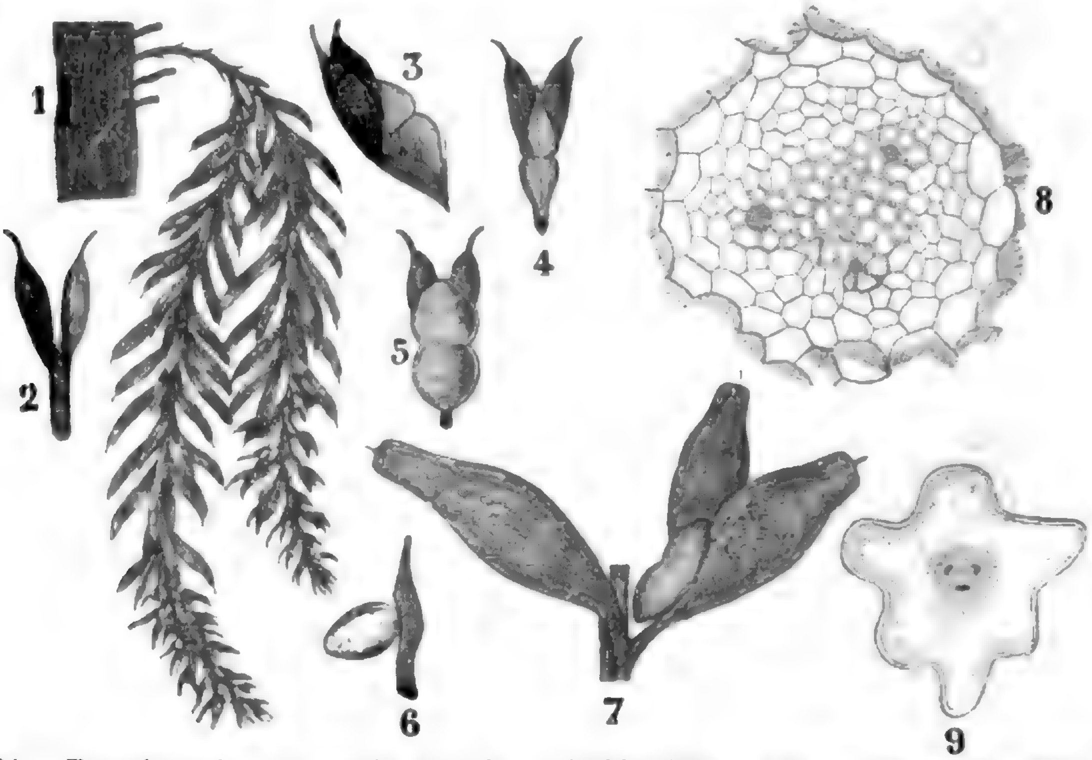


Fig. 94. Tmesipteris tannensis Bernh. 1 Habitusbild. 2 Sporophyll von der Unterseite. 3 von der Seite. 4 und 5 von oben gesehen. 1 bis 5 nach Pritzel. 6 Einfaches Sporophyll mit einem Sporangium. 7 Sproßstück, an welchem ein steriles Blatt und ein fertiles Sporophyll sitzen. 6 bis 7 nach Goebel. 8 Querschnitt des Rhizoms. Nach Dangeard. 9 Querschnitt des Stengels. Nach Campbell.

Humuspolstern; Psilotum triquetrum wächst auch auf dem Boden. Die unterirdischen Rhizome sind blattlos, wie bei Tmesipteris, jedoch reicher verzweigt und enthalten einen endophyten Pilz. Sie erzeugen manchmal Gemmen in großer Zahl, die zur Vermehrung der Pflanze dienen. Die Luftsprosse sind ebenfalls gegabelt, reichlicher als bei Tmesipteris, und zwar in zwei Ebenen, die ungefähr senkrecht aufeinander stehen. Die Anhangsgebilde sind ähnlich, aber kleiner; die Sporangiophoren jedoch sind relativ groß und trag n gewöhnlich 3 synangiale Sporangien. Ihre Zahl kann bis auf 1 herabgehen oder bis 5 steigen (Fig. 95, 18). Die Aehnlichkeit Endodermis. Die Rinde besteht im Rhizom aus stärkeführendem Parenchym, mit endophyter Mycorrhiza in den äußeren Schichten. Im Sproß stellt die Rinde ein assimilierendes Gewebe dar, besonders bei Psilotum. Der Bau der Stele variiert. Im Rhizom ist oft kein deutliches Protoxylem; im Stamm nimmt das Xylem die Gestalt eines hohlen, vielstrahligen Sternes an, mit dem Protoxylem an der Peripherie. Bei Psilotum findet sich an der Basis des Luftsprosses eine schwache sekundäre Holzbildung außerhalb des primären Holzes. Der Bau der Sproßbasis würde also an den Stamm von Sphenophyllum erinnern, während der obere Teil

Digitized by Google

der Achse des Konus von Cheirostrobus ähnelt, jedoch in einfacherem Maße und mit wenig Xylemstrahlen. Der Bau von Tmesipteris ist im wesentlichen derselbe, doch ist das Protoxylem mesarch.

Die Entwickelung der Sporangiophoren zeigt, daß sie Anhangsgebilde des Sporophylls sind. Sie sind durchsetzt von einem Gefäßstrang wie in den anderen Fällen. Die Sporangien entstehen aus einer beträchtlichen Gewebsmasse, in der das sporogene Gewebe nicht scharf abgegrenzt ist. Wenn die Sporenbildung eintritt, so macht ein ansehnlicher Teil der Zellen der sporogenen Masse die Tetradenteilung nicht mit, sondern wird disorganisiert. Sie dienen dann als verlangen. Da muß daran erinnert werden, daß es Species von Lycopodium gibt mit wirtelig gestellten Blättern und andere, bei denen die Blätter unregelmäßig alternieren; und doch läßt man sie mit Recht in dem gleichen Genus. Folglich kann auch in diesem Falle eine Verschiedenheit in der Anordnung der Blätter die Vereinigung der beiden Familien zu einem Phylum nicht hindern.

Wie dem auch sei, so ergibt sich doch aus den gezogenen Vergleichen, daß die Sphenophylleae mit ihren Verwandten eine Pflanzenreihe vom größten Interesse für die Vergleichung darstellen, und daß sie als synthetische Typen Verwandtschaften mit anderen Pteridophytenreihen erkennen lassen,

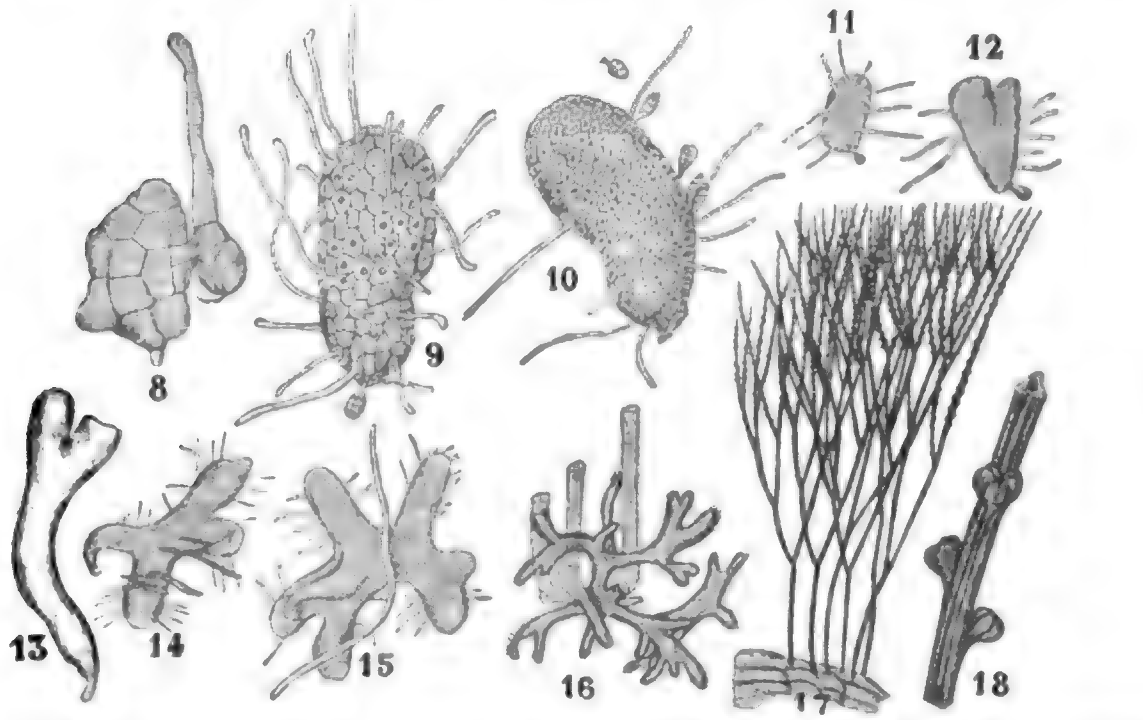


Fig. 95. Psilotum triquetrum. 8 bis 15 verschiedene Stadien der Entstehung junger Pflanzen aus Brutknospen. Die jungen Rhizome zeigen Dichotomie. Nach Solms. 16 Rhizom. 17 Habitusbild desselben. 18 Sproßstück aus der fertilen Region. 16 bis 18 nach Pritzel.

Tapetum. Bei beiden Genera sind die Dehiszenzlinien strukturell vorgebildet. Bei Psilotum strahlen sie von der Mitte aus, so wie bei Sphenophyllum majus.

Die Keimung der Sporen ist unbekannt, der Gametophyt ist nicht mit Sicherheit beobachtet worden.

Die Aehnlichkeit zwischen den lebenden Psilotaceae und den fossilen Sphenophylleae ist hauptsächlich in ihrer Anatomie und in der Natur der Sporophylle und Sporangiophoren gelegen. Die deutlichsten Unterschiede bestehen in der Art der Verzweigung und in der Anordnung der Blätter. Die Frage ist, ob diese Verschiedenheiten genügen, um eine Trennung der beiden, zu der Gruppe der Sphenophyllales vereinigten Familien zu die bei den längst ausgestorbenen Typen klarer hervortreten als bei den heute lebenden Vertretern. Obwohl also bis heute die verschiedenen Reihen in phyletischer Beziehung noch nicht eng miteinander verbunden werden können, so scheint es doch nicht unmöglich, daß mit fortschreitender Kenntnis der Fossilien diese verwandtschaftlichen Beziehungen klarer werden, als das heute der Fall ist. Zurzeit erscheinen die Filicales und die Lycopodiales noch am meisten von den übrigen Pteridophyten isoliert.

Literatur. *Allgemeine Literatur über die Pteridophyta.* **Engler und Prantl,** *Natürliche Pflanzenfamilien, I, 4.* — **Campbell,** *Mosses and Ferns.* — **Goebel,** *Organographie der Pflanzen.* — **Bower,** *Origin of a Land Flora.*

Digitized by Google

— **Scott**, *Studies in Fossil Botany.* — **Solms**, *Paläophytologie.* — **Lotsy**, *Botanische Stammesgeschichte, II: Cormophyta. Zoidiojamia.* — **Luerssen**, *Rabenhorsts Kryptogamen-Flora: Die Farnpflanzen.*

Zu den Familien der Filicales:

Zu **1**: **Renault**, *Cours de Botanique Fossile, III, Kap. VIII, 1883.* — **Scott**, *Studies in Fossil Botany, Vol. I, p. 305, 1908.* — **Seward**, *Fossil Plants, Vol. II, p. 432.* — **P. Bertrand**, *Études sur la Fronde des Zygopteridées, Lille 1909.*

Zu **2**: **Engler und Prantl**, *Natürliche Pflanzenfamilien, I, 4, S. 449.* — **Bower**, *Origin of a Land Flora, 1908, p. 430 bis 494.* — **Campbell**, *The Eusporangiatae. Carnegie Institution, 1911.* — **Bruchmann**, *Bot. Zeit., 1904, S. 227 und Flora, 1906, S. 203.* — **Jeffrey**, *Gametophyte of Botrychium, Toronto 1898.*

Zu **3**: **Engler und Prantl**, *Natürliche Pflanzenfamilien, I, 4.* — **Campbell**, *Eusporangiate Ferns. Carnegie Institute, 1911.* — **Bower**, *Origin of a Landflora, 1908, p. 505 bis 529.*

Zu **4**: **Campbell**, *Mosses and Ferns, p. 346.* — **Faull**, *Anatomy of the Osmundaceae. Bot. Gaz., 1901, p. 381.* — **Kidston and Gwynne-Vaughan**, *Fossil Osmundaceae. Trans. Roy. Soc. Edinb. 1907.* — **Bower**, *Origin of a Land Flora, p. 531 bis 541.*

Zu **5**: **Prantl**, *Die Schizaeaceen, Leipzig 1881.* — **Campbell**, *Mosses and Ferns, 1905, p. 384.* — **Boodle**, *Ann. of Bot., 1901 und 1903.* — **Bower**, *Origin of a Land Flora, p. 542 bis 552.*

Zu **6**: **Campbell**, *Buitenzorg Annales, Vol. XXII, p. 69.* — **Diels**, *Natürliche Pflanzenfamilien, I, 4, S. 350.* — **Bower**, *Origin of a Land Flora, p. 553 bis 564.*

Zu **7**: **Seward**, *Phil. Trans., Vol. 191, p. 171.* — **Tansley and Lulham**, *Ann. of Bot., Vol. 19, p. 475.* — **Bower**, *Origin of a Land Flora, p. 564 bis 569.*

Zu **8a**: **Gwynne-Vaughan**, *Ann. of Bot., XII, p. 71.* — **Bower**, *Origin of a Land Flora, p. 571.*

Zu **8b**: **Prantl**, *Die Hymenophyllaceen, Leipzig 1895.* — **Campbell**, *Mosses and Ferns, p. 372.* — **Boodle**, *Ann. of Bot. 14, p. 455.* — **Sadebeck**, *Natürliche Pflanzenfamilien I, 4, S. 91.* — **Bower**, *Origin of a Land Flora, p. 575 bis 588.*

Zu **9a**: **Christ**, *Bull. de l'Herb. Boissier, 1904, p. 393.* — **Bower**, *Origin of a Land Flora, p. 589.*

Zu **9b**: **Diels**, *Natürliche Pflanzenfamilien I, 4, S. 119.* — **Gwynne-Vaughan**, *Ann. of Bot., 17, p. 708.* — **Bower**, *Origin of a Land Flora, p. 591.*

Zu **9c**: **Prantl**, *Arbeiten K. Bot. Gart., Breslau 1892, S. 17.* — **Gwynne-Vaughan**, *Ann. of Bot., 17, p. 708 ff.* — **Bower**, *Origin of a Land Flora, p. 595 bis 602.*

Zu **9d**: **Diels**, *Natürliche Pflanzenfamilien I, 4, S. 205.* — **Mettenius**, *Abhandl. d. K. Sächs. Ges. d. Wiss., IX, S. 544.* — **Bower**, *Origin of a Land Flora, p. 613.*

Zu **10b**: **Campbell**, *Mosses and Ferns, 1905, p. 396 bis 439.* — **Goebel**, *Ueber die „Frucht" von Pilularia. Bot. Zeit., 1882.* — **Johnson**, *On Marsilia. Ann. of Bot., 1898.* — **Derselbe**, *On Pilularia. Bot. Gaz., Vol. 26, p. 1.* — **Strasburger**, *Ueber Azolla, Jena 1873.* — **Sadebeck**, *Natürliche Pflanzenfamilien I, 4, S. 381 bis 421.* — **Lotsy**, *Botanische Stammesgeschichte II, S. 621 bis 652.*

Zu **11**: **Seward**, *Phil. Transact., Vol. 191, p. 171.* — **Seward and Dale**, *Phil. Trans., Vol. 199, p. 487.* — **Tansley and Lulham**, *Ann. of Bot., 19, p. 475.* — **Bower**, *Origin of a Land Flora, p. 564 bis 569 und 618 bis 622.*

Zu **12a**: **Diels**, *Natürliche Pflanzenfamilien I, 4, S. 113.* — **Bower**, *Origin of a Land Flora, p. 602.* — **Derselbe**, *Studies in the Phylogeny of the Filicales II. Ann. of Bot., 1912.*

Zu **12b**: **Diels**, *Natürliche Pflanzenfamilien I, 4, S. 166.* — **Christensen**, *Biologiske Arbejder, Nov. 1911.* — **Bower**, *Studies in the Phylogeny of the Filicales II. Ann. of Bot., 1912.*

Zu **13c**: **Diels**, *Natürliche Pflanzenfamilien I, 4, S. 245.*

Zu **14**: **Diels**, *Natürliche Pflanzenfamilien I, 4, S. 222.* — **Luerssen**, *Rabenhorsts Kryptogamen-Flora, Vol. III, p. 108 bis 293.*

Zu **15d**: **Diels**, *Natürliche Pflanzenfamilien I, 4, S. 254.* — **Prantl**, *Englers Bot. Jahrb., 1882, S. 416.* — **Gwynne-Vaughan**, *Ann. of Bot., Vol. 17, p. 689 bis 742.*

Zu **1** *Filicales*: **Presl**, *Tentamen Pteridographiae. Peragae 1836.* — **Engler und Prantl**, *Natürl. Pflanzenfamilien I, 4, S. 13 bis 515.* — **Luerssen**, *in Rabenhorsts Kryptogamen-Flora, Vol. III, S. 1 bis 662.* — **Campbell**, *Mosses and Ferns, 1905, p. 229 bis 442.* — **Bower**, *Origin of a Land Flora, p. 430 bis 657.* — **Tansley**, *Lectures on the Evolution of the Filicinean Vascular System. New Phytologist, 1907 bis 1908.* — **Scott**, *Studies in Fossil Botany, 1908, Vol. I, p. 267 bis 353.* — **Lotsy**, *Botanische Stammesgeschichte II, S. 575 bis 705.* — **Hooker**, *Synopsis Filicum, 1883.* — **Christ**, *Die Farnkräuter der Erde, 1897.* — **Derselbe**, *Die Geographie der Farne, 1910.* — **Christensen**, *Index Filicum, 1906.*

Zu **2** *Equisetales*: **Sadebeck**, *Natürliche Pflanzenfamilien I, 4, S. 520.* — **Luerssen**, *Rabenhorsts Kryptogamen-Flora III, S. 622 bis 781.* — **Campbell**, *Mosses and Ferns, 1905, p. 445.* — **Bower**, *Origin of a Land Flora, p. 366.* — **Scott**, *Studies in Fossil Botany, 1908, p. 15.* **C. E. Wiess**, *Beiträge zur fossilen Flora. Steinkohlen-Calamarien, 1876.* — **B. G. Cormack**, *On a cambial development in Equisetum. Ann. of Bot., 1893.* **Lignier**, *Equisetales et Sphenophyllales. Bull. de la Soc. Linn. de Normandie. Caen. 1903.*

Zu **3** *Lycopodiales*: **Spring**, *Monographie des Lycopodiacées, 1841.* — **Treub**, *Ann. Jard. Bot. de Buitenzoy. Vols IV, V, VII, VIII.* — **Pritzel**, *Natürliche Pflanzenfamilien I, 4, S. 563 bis 780.* — **Campbell**, *Mosses and Ferns, 1905, p. 483 bis 561.* — **Baker**, *Handbook of the Fern Allies, 1887.* — **Bower**, *Origin of a Land Flora, p. 290 bis 365.* — **Scott**, *Studies in Fossil Botany, 1908, p. 125 bis 266.* — **Seward**, *Fossil Plants, 1910, p. 30.* — **Lotsy**, *Botanische Stammesgeschichte II, S. 409 bis 501.* — **Bruchmann**, *Viele Abhandlungen in der „Flora" und anderen Zeitschriften. Die Titel derselben, sowie die anderer Arbeiten über das Gebiet, können im Literaturverzeichnis bei Campbell*

Digitized by Google

oder Lotsy in deren oben genannten Werken nachgesehen werden.

Zu 4 Sphenophyllales: **Pritzel**, *Natürliche Pflanzenfamilien, I 4, S. 606 (Psilotaceae).* — **Solms Laubach**, *Ann. Jard. Bot. Buitenzoy. Vol. IV, 1884.* — **Bertrand**, *Arch. bot. du Nord de la France. 1880.* — **Potonié**, *Natürliche Pflanzenfamilien I, 4, S. 515 (Sphenophyllales).* — **Scott**, *Studies in Fossil Botany, 1908, p. 86.* — **Seward**, *Fossil Plants, Vol. II, p. 1.* — **Bower**, *Origin of a Land Flora, p. 398 bis 429.* — **Lotsy**, *Botanische Stammesgeschichte II, S. 502.* — *In diesen Werken mögen auch die Titel der speziellen Arbeiten über die Sphenophyllales nachgesehen werden.*

F. O. Bower.

Faserpflanzen.

I. Allgemeines. II. Pflanzenhaare: a) Baumwolle. b) Pflanzendunen. c) Pflanzenseiden. III. Bastfasern: 1. Zweikeimblättrige Pflanzen mit unverholzten Fasern. a) Flachs. b) Hanf. c) Sunhanf. d) Andere hülsenfrüchtige Fasern. e) Nesselfasern, Ramie. f) Japanische Papierfasern. 2. Zweikeimblättrige Pflanzen mit verholzten Fasern. a) Jutegruppe. b) Adansoniabast. c) Luffa. 3. Einkeimblättrige Pflanzen mit unverholzten Fasern, Ananasfasern, Raphiabast. 4. Einkeimblättrige Pflanzen mit verholzten Fasern, Agavenfasern, Mauritiushanf, Sansevierafasern, Yuccafasern, Manilahanf, Neu-Seeländischer Flachs, Kokosfasern, Esparto, Piassaven, Bambus, Reiswurzeln, Palmblätter, Pandanusblätter, Panamastroh, Strohfasern, Seegras, vegetabilisches Roßhaar. IV. Holzfasern. V. Tannennadeln und Torffasern.

I. Allgemeines.

Faserpflanzen nennt man alle diejenigen Gewächse, die entweder ganz oder in ihren Teilen für die Spinnerei und Seilerei, für Geflechte, für Bürstenwaren, für die Polsterei oder die Papierfabrikation Rohstoffe liefern. Ganze Pflanzen, wie Seegras, Torfmoose und vegetabilisches Roßhaar dienen in der Regel nur als Pack- oder Polstermaterial, grobe Pflanzenteile, wie Palmblätter, Halme oder Baste zu dem gleichen Zwecke oder zu Flechtwerk und rohen Stricken. Die eigentlichen Fasern sind entweder Haargebilde oder Festigkeitselemente des Pflanzenkörpers, meist aus der Rinde, den Blättern oder dem eigentlichen Holze, seltener aus Wurzeln oder Früchten. Da diese Elemente fast bei allen Pflanzen in genügender Ausbildung vorhanden sind, so ist die Zahl der Gewächse, die brauchbare Fasern liefern können, eine sehr große. Dennoch ist die Zahl der wirklich genutzten Faserpflanzen im Verhältnis dazu nur gering. Sie sind mit wenigen Ausnahmen sehr alte Kulturpflanzen. Die guten Eigenschaften ihrer Fasern, die leichte Kultur und ihre Ausbreitung, sowie die einfache Gewinnungsweise der Fasern haben zu ihrer Auswahl geführt und sie z. T. durch Jahrtausende als wichtige Nutzpflanzen erhalten und verbreitet. Wenn auch die Baumwolle eine gefährliche Konkurrentin der Flachsfaser geworden ist und der echte Hanf in verschiedenen tropischen Fasern brauchbare Ersatzstoffe gefunden hat, so stehen doch beide heute noch in ihren besonderen Eigenschaften unübertroffen da.

Die Verwendbarkeit der Pflanzenfasern hängt im wesentlichen ab von dem Bau ihrer Zellen und von der Struktur und der chemischen Zusammensetzung ihrer Zellwand. Die Stärke der Zellwand und ihr Verhältnis zum Hohlraum der Zelle bedingen im allgemeinen die Festigkeit und die Elastizität der Fasern. Die besondere Struktur der Wände, die als Schichtung bezeichnet wird, scheint diese Eigenschaften wesentlich zu erhöhen und von der chemischen Zusammensetzung hängt neben den genannten Eigenschaften vor allem die Haltbarkeit der Faser ab. In dieser Beziehung ist eine Faser um so wertvoller, je mehr sie aus reiner Zellulose besteht. Solche Fasern sind Baumwolle, Flachs, Hanf und Ramie. Fast alle übrigen Fasern sind mehr oder weniger verholzt, d. h. sie enthalten neben Zellulose in erster Linie noch Lignin, einen chemisch noch nicht ganz sicher festgestellten Körper, der durch chemische Verfahren aus der Faser entfernt werden kann. Dadurch wird aber die Gewichtsmenge der Fasern geringer und die an sich schon von dem Grundstoff der reinen Zellulosefasern verschiedene Zellulose in ihren Eigenschaften weiter verändert und damit weniger widerstandsfähig.

Die Erkennung der wichtigsten Pflanzenfasern in ihrer handelsüblichen Aufmachung ist bei längerer Uebung nicht nur für die einzelnen Arten, sondern auch für die Sorten derselben und die verschiedene Herkunft sehr wohl möglich. Für die Feststellung in Geweben und im Papier reichen die verschiedenen anatomischen Verhältnisse in der Regel aus. Wertvolle Unterstützung erhält die Prüfung durch das verschiedene chemische Verhalten der verholzten und der unverholzten Fasern, sowie durch die voneinander abweichenden optischen Eigenschaften (Doppelbrechung, Dichroismus).

Die Benennung der Pflanzenfasern gibt vielfach dadurch zu Mißverständnissen Anlaß, daß die Bezeichnung Hanf oder Flachs neuen, in ihrem Werte meist abweichenden Fasern beigelegt worden ist. Auch die Abstammung ist für manche Fasern noch recht unsicher.

Digitized by Google

II. Pflanzenhaare.

Das wichtigste und einzige als Spinnfaser verwendete Pflanzenhaar und heute die wichtigste Pflanzenfaser überhaupt ist die Baumwolle. Alle übrigen Pflanzenhaare sind bis jetzt nur versuchsweise versponnen worden, sie werden dagegen in recht erheblichem Umfange als Polstermaterial verwendet. Man teilt sie in zwei Gruppen, die Pflanzendunen und die Pflanzenseiden.

a) Baumwolle. Die Baumwollpflanze (Gossypium, Familie der Malvaceen) ist eine sehr alte Kulturpflanze. Ihre Heimat ist wahrscheinlich Indien, von wo aus sie sich in Asien nach Osten und Westen ausgebreitet hat. Auch in der neuen Welt trafen die Entdecker die Baumwolle als Kulturpflanze an. Die Kenntnis der verschiedenen Arten der Gattung Gossypium und ihrer Kulturformen ist noch recht unsicher. Obwohl Watt in seiner neuesten Bearbeitung 41 Arten unterscheidet, kommen für uns nur 4 in Betracht, Gossypium herbaceum L., die krautige oder indische Baumwolle, Gossypium barbadense L., die Sea Island-Baumwolle der Vereinigten Staaten, Gossypium hirsutum L., die Upland-Baumwolle der Vereinigten Staaten und Gossypium brasiliense Macf., die brasilianische oder Peru-Baumwolle. Von diesen Hauptarten gibt es eine große Anzahl von Kulturvarietäten und Kreuzungen, und so entstand eine große Zahl von für den Handel brauchbaren Sorten. Die Baumwolle ist in den meisten kultivierten Formen ein mehrjähriger bis zu 3 m hoher Strauch mit 3 bis 7 lappigen Blättern und großen einzeln stehenden weißen, gelben oder roten Blüten. Diese entwickeln etwa eigroße 3- bis 5-fächerige Kapseln mit zahlreichen Samen. Die Oberhaut der letzteren bildet eine beträchtliche Zahl ihrer Zellen zu 1 bis 5 cm langen, 0,02 bis 0,04 mm breiten, einzelligen, zylindrischen, weißen bis braunen Haaren aus, welche die einzelnen Samen in einen dichten, weißen Haarfilz einbetten. Gleichmäßigkeit, Feinheit, Länge (Stapel) und seidiger Glanz dieser Haare bedingen die Qualität der Baumwolle. Diese Eigenschaften vereinigt in ganz vorzüglicher Weise die Sea Island Baumwolle und die in Aegypten gezogenen Sorten dieser Art. Die brasilianische oder Peru-Baumwolle kommt der Sea Island-Baumwolle nahe, nur daß sie an Stelle des seidigen einen wolligen Charakter hat. Die Upland - Baumwolle hat einen mittleren Stapel von etwa 30 mm, stellt die Durchschnittsware dar und liefert die größten Mengen des Handels. Die indische Baumwolle hat den geringsten Stapel und ist grob und hart. Die obengenannten wichtigsten Kulturgebiete geben bereits annähernd ein Bild von der Verbreitung des Baumwollbaues. Seine nördliche Grenze ist etwa der 36. Grad n. B., die südliche der 30. Grad s. B. Die Pflanze verlangt viel Sonne, möglichst gleichmäßige Wärme und einen lockeren Boden. Nicht zu heftige Regen in der Zeit ihrer Entwickelung sind erwünscht. Die Reife- und Erntezeit muß möglichst regenfrei sein. Fehlender Regen läßt sich gut bei hinreichender Luftfeuchtigkeit durch Bewässerung ersetzen. Mit nur wenigen Ausnahmen (Peru-Baumwolle) wird die Baumwolle als einjährige Pflanze gezogen. Sie braucht etwa 4 bis 6 Monate zur Reife. Die Kapseln reifen nicht gleichmäßig, so daß sich die Ernte über eine längere Zeit ausdehnt. Die Wolle wird vorsichtig aus den aufgesprungenen Kapseln herausgenommen und meist gleich beim Ernten in fehlerlose und beschädigte getrennt. Die Trennung der Wolle von den Samen geschieht auf besonderen Maschinen, sogenannten Säge- oder Rollergins. Das Verhältnis von Samen zur Wolle ist etwa 2:1. Die Baumwolle wird dann in Ballen von etwa 250 kg gepreßt. Die Welternte beläuft sich auf etwa 19 Mill. Ballen, davon kommen 13 Mill. auf die Vereinigten Staaten, 3 Mill. auf Indien, 2 Mill. auf Aegypten, der Rest verteilt sich auf die übrigen Länder. Neuerdings sind besonders in Afrika Anbauversuche mit Baumwolle, teilweise mit gutem Erfolg, gemacht worden. Das Baumwollhaar ist mikroskopisch an seinen korkzieherartigen Drehungen sehr gut zu erkennen. Da das Haar ferner vom Samen abgerissen wird, so ist die Zelle auf einer Seite offen. Es besteht zum größten Teil aus reiner Zellulose und zeigt infolgedessen die üblichen Reaktionen.

Die Baumwolle ist heute unsere wichtigste Spinnfaser, die billigeren Manufakturwaren werden fast ausschließlich aus Baumwolle hergestellt. Mit Leinen, Wolle und Seide gibt sie die sogenannten halbleinenen, halbwollenen und halbseidenen Gewebe. Die Baumwolle war ferner der Ausgangspunkt für die Gewinnung von reiner Zellulose und die Herstellung von Schießbaumwolle. Die auf verschiedenem Wege gelöste Zellulose der Baumwolle liefert, in feine Fäden gepreßt, die sogenannte Kunstseide. Mit schwachen Säuren oder Laugen behandelt, verliert das Baumwollhaar seine Windungen, schwillt etwas an und wird auf der Oberfläche stark glänzend. Man nennt derartig behandelte Gewebe oder Garne mercerisiert. Sie zeichnen sich durch besonderen Glanz aus.

b) Pflanzendunen. Pflanzendunen stammen aus den Früchten der Wollbäume, Bombax- und Eriodendronarten aus der

Digitized by Google

Familie der Bombaceen. Es sind mächtige Urwaldbäume aus verschiedenen Gebieten der Tropen, die in ihren mindestens 10 cm langen und 4 cm starken, walzenförmigen, oben und unten zugespitzten Früchten an der Fruchtwand dichte Haarmassen entwickeln, in die die Samen eingebettet sind. Die Haare sind bis zu 3 cm lang, 0,025 mm breit, von schwachgelber Farbe und wesentlich dünnwandiger und infolgedessen gebrechlicher als Baumwolle. Man hat sie daher zum Spinnen bisher nur versuchsweise ohne dauernden Erfolg verwendet. Die Fasern haben aber zwei Eigenschaften, die ihre technische Verwendung veranlaßt haben. Die stark zusammengepreßten Haarmassen gehen an der Sonne wieder auf und lockern sich wie Bettfedern, sie eignen sich daher ganz vorzüglich als Stopfmaterial und finden als solches allgemeine Verwendung. Ferner sind sie schwer benetzbar und werden deshalb und wegen ihrer Leichtigkeit für Rettungsgürtel verwendet.

Die wichtigste Pflanzendune ist der Kapok, von Eriodendron anfractuosum D.C., einem Baume des tropischen Ostindiens, der heute über alle Tropen verbreitet ist. Er wird in erster Linie auf Java kultiviert. Die zweite wichtige Faser dieser Art kommt von Bombax malabaricum D. C., dem Simul cotton tree Vorderindiens. Das Produkt geht ebenfalls unter dem Namen Kapok und wird dem javanischen meist gleichwertig erachtet. Verwandte Arten und Gattungen dieser Bäume liefern in Indien, Westafrika und Südamerika ähnliche Fasern, die aber zurzeit noch keine Handelsbedeutung haben. Die indische und javanische Rohware ist sehr leicht an der verschiedenen Gestalt der stets vorhandenen Samen zu unterscheiden. Anatomisch sind die ebenfalls einzelligen Haare sehr einfach gebaut und leicht von Baumwolle, aber schwer voneinander zu unterscheiden. Sie sind schwach verholzt.

c) Pflanzenseiden. Pflanzenseiden werden im allgemeinen die seidigglänzenden Haarschöpfe vieler Früchte oder Samen genannt. Technisch wichtig geworden sind bis jetzt allein die Samenhaare der Asclepiadeen, Calotropis gigantea R. Br. und Calotropis procera R. Br., deren Samenschöpfe unter dem Namen Akon oder Akund aus Vorderindien in erster Linie als Kapoksurrogat in beträchtlicher Menge exportiert werden. Die Haare sind meist bis zu 3 cm lang, 0,04 mm breit, sehr stark seidenglänzend und ziemlich brüchig. Man hat sie neuerdings dadurch zum Spinnen geeignet zu machen versucht, daß man die Haare durch geeignete Chemikalien etwas zum Quellen bringt und damit fester macht. Ein dauernder Spinnstoff sind sie aber noch nicht. Auch der Akon ist an den meist vorhandenen Samen mit Sicherheit bestimmbar. Die Faser ist auch etwas verholzt und anatomisch durch schwach hervortretende Längsleisten im Innern der dünnen Wandungen ausgezeichnet. Unter den vielen anderen Pflanzenseiden scheint bis jetzt nur diejenige des westafrikanischen Kautschukbaumes Kickxia elastica versuchsweise in größeren Mengen eingeführt worden zu sein.

III. Bastfasern

Bastfasern sind in der Regel mehrzellige Stränge aus dem Rindengewebe zweikeimblättriger Pflanzen oder Gefäßbündel oder deren Festigkeitselemente aus den Geweben (Blättern, Stengeln) einkeimblättriger Gewächse. Mit dieser Gruppierung stimmt auch annähernd die Verwendung. Die zweikeimblättrigen Gewächse liefern die feineren Spinnfasern, die einkeimblättrigen meist die gröberen Seilereifasern bis zu den ganz groben Bürstenfasern. Doch gibt es hier auch Uebergänge.

1. Zweikeimblättrige Pflanzen mit unverholzten oder nur zum Teil verholzten Fasern. 1a) Flachs, Linum usitatissimum L. Die wertvollste pflanzliche Spinnfaser ist immer noch, trotz der Ueberflügelung durch die Baumwolle, der Flachs. Er ist auch eine der ältesten Kulturpflanzen. Die anmutige, bis zu 1 m hohe, blau blühende Pflanze wird zur Fasergewinnung vor allem in Rußland, Deutschland, Oesterreich, Belgien und Irland kultiviert. Für die Gewinnung ist ein sorgfältiger Aufbereitungsprozeß notwendig. Die Pflanzen werden kurz vor der Samenreife ausgezogen und von Blättern und Früchten durch Riffeln befreit. Um die Faser aus dem Rindengewebe zu gewinnen und von dem Holzkörper zu trennen, ist eine Lockerung und teilweise Zerstörung des Rindengewebes notwendig. Dies geschieht in der Regel mit Hilfe des Wassers entweder durch Tau und Regen oder durch Einstellen der Stengelbündel in fließendes Wasser oder in besonders hierfür hergestellte Gruben. Der Fäulnisprozeß, der die Bastfasern umgebenden Gewebe — die sogenannte Röste — wird hierbei durch die Tätigkeit von Bakterien unterstützt, deren Reinkulturen gelegentlich zur Förderung des Röstprozesses angeboten wurden. Auch Aufbereitung mit warmem Wasser und mit chemischen Hilfsmitteln findet statt. Die Faser muß dann noch getrocknet und von den anhaftenden, nicht ganz zerstörten Rindenteilen durch Hecheln befreit werden. Der beste Flachs ist lichtblond und von weichem Griff. Die einzelnen Bastfaserstränge sind 0,3 bis 1 m lang und 0,1 bis 0.2 mm dick. Die Fasern finden sich in konzentrisch angeordneten Bündeln von etwa 8 bis 10

Digitized by Google

Zellen in der Rinde verteilt. Die einzelnen Zellen haben einen eckigen Querschnitt und sehr starke Wandungen, so daß nur ein feiner zylindrischer Hohlraum bleibt. Sie sind etwa 40 mm lang und haben einen Durchmesser von 0,02 mm. Die Flachszelle zeigt mehrfach schwache Verschiebungen im Längsverlaufe (sogenannte Stauchungserscheinungen). Die Faser ist stark doppelbrechend und gibt alle Zellulosereaktionen. Die Fasern des russischen Steppenflachses und die Fasern vom Grunde des Flachsstengels zeigen ein abweichendes, dem Hanf ähnliches anatomisches Verhalten, so daß sie nur sehr schwer vom Hanf unterschieden werden können.

1b) Hanf, Cannabis sativa L. Gleich dem Flachse ist der Hanf eine der ältesten Kulturpflanzen. Sein Verbreitungsgebiet ist größer als das des Flachses, jedoch dient er in den tropischen Ländern fast ausschließlich zur Gewinnung seiner narkotischen Bestandteile (Haschisch). Außer den Hauptproduktionsländern des Flachses kommen für den Hanf noch Ungarn, Italien, Indien und China hinzu. Die Hanffaser dient in der Spinnerei nur zu groben Geweben und wird in erster Linie zu Seilen und Stricken verarbeitet. Sie ist äußerlich dem Flachs ähnlich, aber in der Regel länger. Der Querschnitt der Zellen ist mehr länglich verdrückt mit spaltenförmigem Hohlraum. Die Zellwand ist ebenfalls geschichtet, stark doppelbrechend und zeigt Stauchungserscheinungen wie der Flachs. Sie ist aber meist schwach verholzt. Der Hanf ist zweigeschlechtlich und liefert in seinen männlichen Pflanzen ein feineres, wertvolleres Produkt. Die Aufbereitung der Faser wird ähnlich wie beim Flachs gehandhabt.

1c) Sunnfaser, von Crotalaria juncea L. Außer dem eigentlichen Hanf (Cannabis) werden in Indien eine Reihe von Faserpflanzen kultiviert, deren Fasern im Handel als „indischer Hanf" bezeichnet werden. Diese Sorten kann man in zwei Gruppen teilen, die eine steht dem echten Hanf näher, während die andere den Jutesorten zugerechnet werden muß. Der wichtigste der ersten Gruppe ist der sogenannte Sunnhanf (auch indischer, Bombay- oder brauner indischer Hanf), der wie Flachs aufbereitet wird und eine aus feinen und groben Strängen zusammengesetzte, stärker verholzte Faser von hanfähnlichem Querschnitt liefert.

1d) Andere hülsenfrüchtige Faserpflanzen. Neben anderen Arten der Gattung Crotalaria liefern auch Sesbania- und Vignaarten brauchbare, dem Sunn ähnliche Fasern. In China wird neben dem echten Hanf die Leguminose Pueraria thunbergiana Benth. seit alten Zeiten als Faserpflanze „Ko" gebaut.

1e) Nesselfasern, Ramie. Die einheimische Brennessel liefert eine feine unverholzte Spinnfaser, die früher in beschränktem Maße verwendet wurde, bisher aber ohne dauernden Erfolg. Dagegen hat die im Osten Asiens, vor allem in China seit langem kultivierte Urticacee Boehmeria nivea Gaud. allmählich eine dauernde Verwendung in der europäischen Industrie gefunden. Diese Ramie, Chinagras oder Rhea genannte Faser wird aus den Rindenteilen der mehrjährigen Pflanze gewonnen. Schwierig ist die Aufbereitung, da die Bastfaserbündel aus dem Grundgewebe der Rinde mit dem einfachen Röstverfahren nicht gewonnen werden können. Die Ramie kommt daher in der Regel als Rohramie in breiten Baststriemen in den Handel. Die eigentliche Spinnfaser wird erst in den Fabriken durch eigene Verfahren, die die Isolierung der Bastfasern auf chemischem Wege ohne Schädigung der Qualität der Faser bewirken, gewonnen. Dadurch werden die Bastbündel annähernd in die einzelnen Zellen zerlegt, die bei der Ramie eine ungewöhnliche Länge bis zu 260 mm und einen Durchmesser von 0,04 bis 0,08 mm haben (sogenannte kotonisierte Ramie). Die Faser ist unverholzt, hat einen zusammengedrückt-elliptischen, häufig unregelmäßig ausgebuchteten Querschnitt, ist geschichtet und zeigt Stauchungserscheinungen und deutliche Längsspalten. Sie wird u. a. zu dem Grundgewebe der Glühstrümpfe verwendet.

In China und Japan wird eine andere Nessel Urtica thunbergiana Sieb. u. Zucc. mit ähnlichen Fasern kultiviert. Sie liefert den sogenannten Berghanf (Shan ma).

1f) Japanische Papierfaser. Der Papiermaulbeerbaum Broussonetia papyrifera Vent. besitzt in seiner Rinde so dichte Lagen von Bastfaserbündeln, daß sie wie große Stücke Papier gewonnen und verwendet werden können. In die einzelnen Fasern zerlegt, dient der Bast seit alten Zeiten zur Verfertigung des japanischen Papiers. Aehnlich verwendet man in Japan die Fasern der Thymelaeacee Edgeworthia papyrifera Sieb. u. Zucc., dort Mitsumata genannt.

2. Zweikeimblättrige Faserpflanzen mit verholzten Fasern. 2a) Jutegruppe. In diese Gruppe gehören im wesentlichen Fasern von Tiliaceen und Malvaceen. Der Hauptvertreter ist die echte Jute, Corchorus capsularis L. Auch andere Arten dieser Gattung, vor allem Corchorus olitorius L. werden zur Fasergewinnung angebaut. In Indien wird Jute schon seit langem kultiviert, auch heute noch kommt $^{19}/_{20}$ der Handelsware von dort. Die einjährigen Pflanzen werden 2,5 bis 5 m hoch; sie werden in

Digitized by Google

ähnlicher Weise wie Flachs bei der Fasergewinnung aufbereitet. Die gewonnenen Baststränge sind länger als beim Hanf und Flachs und bei gut aufbereiteter Faser von weißlichgelber, oft glänzender Farbe. Die einzelnen Zellen des Bastes haben einen vieleckigen Querschnitt und einen verhältnismäßig großen rundlichen Innenraum. Ihre Länge ist ca. 20 mm im Mittel, der Durchmesser 0,02 mm. Besonders charakteristisch für die Jute und ihre Verwandten ist die ungleiche Weite des Innenraumes der Zellen. Die Fasern zeigen sämtliche Reaktionen für Verholzung. Die Jute spielt heute in erster Linie als Ersatz für Hanf und Leinen eine Rolle bei der Herstellung von Seilen, Säcken, billigen Möbelstoffen, Teppichen usw. Neben der echten Jute kommt neuerdings der indische Gombohanf von Hibiscus cannabinus L. als Javajute in den Handel. Während aus Südchina echte Jute exportiert wird, stammt die nordchinesische von der Malvacee Abutilon Avicennae Gaertn. Von anderen Malvaceen ist noch Urena lobata Cav. zu erwähnen, die als Unkraut über die ganzen Tropen und Subtropen verbreitet ist. Ihre Fasern wurden neuerdings als Canhamo brasileiro aus Südamerika in den Handel gebracht. Alle diese Fasern zeigen ähnliches Verhalten wie die Jute.

2b) Adansoniafaser. Der ebenfalls zu den Malvaceen gerechnete Affenbrotbaum Adansonia digitata L. liefert in seinen starken, in breiten Platten ablösbaren Bastlagen seit einigen Jahren ein neues Rohmaterial für die Papierfabrikation.

2c) Luffa. Die in allen Tropen verbreiteten, vor allem in Japan kultivierten Netzgurkenarten Luffa acutangula Roxb. und Luffa cylindrica Roem. haben in ihren bis zu 50 cm langen, walzenförmigen Früchten ein netzartiges Fasergewebe, das nach dem Trocknen der Früchte gewonnen und zur Herstellung von Schuhsohlen, Badeschwämmen usw. in großen Mengen regelmäßig exportiert wird.

3. Einkeimblättrige Pflanzen mit unverholzten Fasern. Die Zahl der Faserpflanzen dieser Gruppe ist gering. Von Bedeutung sind nur die Ananasfasern und der Raphiabast.

3a) Ananasfasern. Wahrscheinlich sind es wilde Arten der Gattung Bromelia, die in den Tropen vielfach als Heckenpflanzen Verwendung finden, oder verwilderte Formen der Fruchtananas, die die Fasern des Handels liefern. In West- und Ostindien, vor allem auf den Philippinen gewinnt man die feine, weiße, fast unverholzte Faser zur Herstellung von kostbaren Geweben, die dort Piña genannt werden. Die Faserbündel der echten Ananasfaser haben zum mindesten im inneren Teil Zellen von auffallend kleinem Querschnitt. Im Handel erscheint oft Sisal als Surrogat für Ananas.

3b) Raphiabast. Raphiabast ist ein richtiger Bast im technischen Sinne. Er besteht aus breiten gelblichen Bändern, die von den Blattfiedern der madagassischen Palme Raphia Ruffia Mart. gewonnen werden. Der Bast bildet unter der Oberhaut der Länge nach verlaufende Stränge, die mit der Oberhaut von den entlang der Mittelrippe gespaltenen Fiedern abgezogen und dann getrocknet werden. Er findet heute an Stelle des Lindenbastes ausgedehnte Verwendung in der Gärtnerei.

4. Einkeimblättrige Pflanzen mit verholzten Fasern. 4a) Agavenfasern. Die Heimat der faserliefernden Agaven ist Mittelamerika. Dort werden verschiedene Arten gebaut und genutzt. Von größerer Bedeutung sind der Sisalhanf von Agave rigida var. sisalana Engelm. und die kürzeren stärkeren Fasern der Agave heteracantha Zucc. und Agave tequilana Web., die unter dem Namen Ixtle, Mexican Fibre von Tula und Jaumave in den deutschen Handel kommen. Seit etwa 20 Jahren wird die Sisalagave auch in anderen tropischen Gebieten, besonders in Deutsch-Ostafrika mit gutem Erfolge gebaut. Die Agaven gehören zur Familie der Amaryllidaceae. Sie bilden mächtige Blattrosetten mit 40 und mehr fleischigen bis zu 2 m langen Blättern. Aus dem Herzen der Rosette entwickelt sich der Blütenschaft, der entweder reichlich Früchte oder junge Brutknospen (Bulbillen) trägt. Nach dem Blühen, das erst nach mehreren, oft sogar nach vielen Jahren eintritt, geht die Pflanze zugrunde. Sie treibt ferner an Ausläufern reichlich Ableger. Die Blätter der Agaven werden bis auf die beiden inneren Kreise der jüngsten Blätter am Grunde abgeschnitten und in besonderen Maschinen gequetscht und geschabt. Die so gewonnenen Fasern werden dann durch Spülen in klarem Wasser von dem noch anhaftenden grünlichen Blattschleim befreit und zum Trocknen an der Sonne aufgehängt. In Maschinen mit rotierenden Bürsten werden die Fasern endlich noch gründlich von Schäbeteilen gereinigt. Die Faserstränge sind bis zu 2 m lang, etwas flach und bei guter Ware von schöner weißer Farbe. Der Sisalhanf dient in erster Linie zur Herstellung von Stricken und Tauen. Die Abfälle werden als Polstermaterial und in der Papierfabrikation verwendet. Der mikroskopische Querschnitt zeigt eine rundliche oder halbmondförmige Anordnung der zahlreichen, das Bündel zusammensetzenden Zellen. Der Querschnitt der Zellen ist vieleckig und ebenso der Umriß des weiten Innenraums.

Digitized by Google

Die Ixtle besteht aus kürzeren, höchstens 1 m langen, steiferen Fasersträngen, die vor allem als Ersatz für Borsten in der Pinsel- und Bürstenfabrikation, sowie gefärbt als Roßhaarersatz Verwendung finden. Die Ixtle von Palma, Mexiko, stammt nach neueren Forschungen von einer Yucca (s. unten).

4b) Mauritiushanf. Mauritushanf stammt von Fourcroya gigantea Vent. aus derselben Pflanzenfamilie und wird vielfach zu Unrecht Aloehanf genannt. Die Pflanze ist in ihrer Tracht den Agaven ähnlich, nur sind die Blätter heller grün und weniger fleischig. In der Kultur zieht man heute fast allgemein die Agaven vor. Die Fasern sind dem Sisal ähnlich.

4c) Sansevierafaser oder Bowstring-hemp. Der Hanf stammt von verschiedenen, zu den Liliaceen gehörenden, meist im tropischen Afrika heimischen Sansevieraarten. Er wird bis jetzt nur in geringem Umfange von den wilden Beständen der Pflanzen gewonnen. Er ist meist kürzer als der Sisal, im übrigen in guter Aufbereitung diesem ähnlich.

4d) Yuccafasern. Während die Yuccafasern bisher nur von lokaler Bedeutung waren, soll der größte Teil der Palma Ixtle aus Mexiko von der Yucacee Samuela carnerosana Trel. stammen.

4e) Manilahanf. Manilahanf wird die Faser der auf den Philippinen heimischen und allein dort genutzten Bananenart Musa textilis Louis Née genannt, die dort auch Abaca heißt. Die Pflanzen haben durchaus die Tracht der Fruchtbananen, nur bilden die scheidenartigen Blattstiele einen verhältnismäßig höheren Scheinstamm. Die Gewinnung der Faser erfolgt aus den Blattstielen, indem die ganze Pflanze im zweiten bis vierten Jahre kurz vor der Blüte oder Fruchtbildung über dem Boden abgeschnitten wird. Die einzelnen Blattstiele werden in mehrere Längsstreifen zerlegt und auf einer einfachen, von den Eingeborenen hergestellten Aufbereitungsmaschine entfasert. Die so isolierten Fasern werden durch Schwingen und Schlagen möglichst vollständig gereinigt und sofort getrocknet oder vorher noch gewaschen.

Die gewonnene Faser ist bis zu 2 m lang und von gelblicher Farbe mit einem schwachen Stich ins Rötliche. Der Querschnitt zeigt ähnliche Verhältnisse wie beim Sisal, nur daß die Konturen der Bastzellen mehr rundlich als vieleckig sind. In der Asche des Manilahanfs finden sich sogenannte Stegmata, kieselsäureführende Inhaltsmassen der Begleitzellen der Fasern. Sie sind in ihrer Form für den Manilahanf charakteristisch. Der Manilahanf dient in Europa fast ausschließlich zur Herstellung von Schiffstauen, für die er neben dem Hanf wegen seiner Widerstandsfähigkeit gegen Wasser und seiner Leichtigkeit besonders geeignet ist. Auf den Philippinen werden von der Faserbanane durch sorgfältigere Aufbereitung und Auswahl auch feinere Spinnfasern gewonnen, die zur Herstellung von zarten wertvollen Geweben dienen. Die Abfälle des Manilahanfes finden in ziemlichem Umfange in der Papierfabrikation Verwendung.

Auch von anderen Bananenarten, so von der Obst- und Mehlbanane, und einigen in Ostafrika aufgefundenen neuen Arten sind versuchsweise Fasern gewonnen worden, diese sind aber bisher ohne große Bedeutung für Industrie.

4f) Neuseeländischer Flachs, Phormium tenax Forst. Wie der Name bereits sagt, ist die Faser dieser in Neuseeland heimischen, zu den Liliaceen gehörenden Pflanze wegen ihrer guten Eigenschaften dem Flachs an die Seite gestellt worden. Sie gehört aber in die Gruppe der Agavenfasern und dient im wesentlichen zur Herstellung von Seilen. Die Produktion im Heimatlande ist eine in den Jahren recht schwankende und auch die Anbauversuche in anderen Gebieten haben bisher keine nennenswerten Erfolge gebracht. Man zieht guten Sisal der Phormiumfaser vor.

4g) Kokosfaser oder Coir. Das Fasergewebe der Kokosnüsse ist schon seit langem zu groben Stricken, Matten und Läufern verarbeitet worden. Die Fasermasse wird durch einen Röstprozeß gewonnen, in dem die gröberen Stücke der Faserhülle längere Zeit im Wasser geweicht werden. Nach dieser Vorbehandlung wird die Masse getrocknet, geklopft und in einzelne Faserstränge zerlegt, die entweder zu Bündeln gebunden oder bereits zu Stricken verarbeitet verschickt werden. Neuerdings werden auch, besonders seitdem man die Färbung der Faser erreicht hat, recht geschmackvolle und dauerhafte Zimmerteppiche aus ihr verfertigt. Die Faser ist je nach der Größe der Früchte bis zu 35 cm lang, von hellgelber bis brauner Farbe und bis zu 0.3 mm stark.

4h) Esparto oder Alfagras, Stipa tenacissima L. und Lygeum spartum Loeffl. Esparto liefert in seinen durch die Zusammenfaltung der halb zylindrischen Blatthälften anscheinend stielrunden Blättern im Heimatlande (Algier, Tunis, Spanien) das Rohmaterial für Schuhe, Flechtarbeiten und grobe Stricke (Umschnürung der spanischen Apfelsinenkisten). In neuerer Zeit findet es als sogenannter Strohhalm der Virginiazigarren, gebleicht in der Papierfabrikation (gute englische Briefpapiere) und schließlich feiner gehechelt als Spinnmaterial Verwendung.

Digitized by Google

Die kurzen Haare sind ein brauchbarer Anhaltspunkt, Esparto im Papier festzustellen.

4i) Piassaven. Piassaven sind die fischbeinähnlichen, aber mehr stielrunden starken Gefäßbündel aus den meist schon verwitterten Blattstielen verschiedener Palmen. Das Material kam zunächst vor etwa 60 Jahren als Verpackung aus Brasilien und wurde als äußerst brauchbar für die Bürsten-und Besenfabrikation erkannt. Es stammte von den Palmen Leopoldinia Piaçaba Wall. und Attalea funifera Mart. Ueber Para und Bahia kommen die beiden Sorten in den Handel. Die starke Ausbreitung dieses Rohstoffes in der Industrie brachte neue Sorten auf den Markt. Heute sind es namentlich die westafrikanischen Piassavapalmen, Raphia spec., die vor allem aus Liberia, Ober- und Niederguinea die Piassave des Handels liefern. Außerdem kommt noch eine Piassave von der madagassischen Palme Dictyosperma fibrosum Wright und eine andere unter dem Namen Bassine oder Palmyrafaser von der ostindischen Palme Borassus flabellifer L. in den Handel.

Zu den Piassaven rechnet man ferner die meist recht dünnen, pferdehaarähnlichen, schwarzen, stielrunden, sehr festen, Kitul genannten Faserstränge der ostindischen Palme Caryota urens L. Unter dem Namen Gomuti ist in Hinterindien eine ähnliche, etwas feinere Faser von der Palme Arenga saccharifera L. in Gebrauch, die neuerdings zu Ueberzügen für Polierwalzen u. a. verflochten wird.

4k Bambus. Aus den Bambushalmen wird durch Spalten der einzelnen Glieder in feine Stäbe ein vielfach verwendetes Piassavasurrogat hergestellt.

4l) Zacaton oder sogenannte Reiswurzeln. Sie werden in Mexiko aus den Wurzeln der Gräser Epicampes stricta Presl., Epicampes macrocera Benth., Agrostis tolucensis H. B. K. und einer Festuca spec. hergestellt. Die langen welliggekrümmten, etwa 1 bis 2 mm starken Wurzeln werden von der Rindenschicht befreit und durch Waschen, Reiben mit Steinen, Trocknen und eventuell Schwefeln marktfähig gemacht. Sie kommen in armstarken Bündeln bis zu 50 cm Länge in den Handel und werden für grobe Bürsten- und Besenwaren verwendet.

4m) Palmblätter, Pandanusblätter, Panamastroh. In ihren Heimatländern dienen die Blätter der meisten Palmen und Schraubenbäume zur Herstellung von gröberen und feineren Geflechten sowie zum Teil zur Gewinnung von Fasern für Stricke. Für den europäischen Markt von Wichtigkeit sind die Blätter der kleinen Fächerpalme des Mittelmeergebietes Chamaerops humilis L., deren Fächerblätter in Nordafrika, Sizilien und Spanien zu Körben, Fächern, Schuhen u. a. verarbeitet werden. Die jungen, noch nicht entfalteten Blätter werden durch Hecheln in roher Weise in Längsstreifen zerlegt und zu Zöpfen zusammengedreht. Sie sind in dieser Form als Crin d'Afrique, Pflanzenhaar, Krollhaarsplint oder vegetabilisches Roßhaar ein als Polstermaterial verwendeter gebräuchlicher Handelsartikel.

Die zu feinen Streifen geschnittenen und getrockneten Fiedern vieler Palmen und Blätter der Schraubenbäume liefern Flechtmaterial für Hüte. Neuerdings kommen solche Hüte in großen Mengen von den Philippinen und Madagaskar. Die feinste Flechtfaser für Hüte stammt aber von der Cyclanthacee Carloduvica palmata R. u. Pav., einer in der Tracht den Fächerpalmen ähnlichen Pflanze Südamerikas und Westindiens. Aus ihren noch nicht entfalteten jungen Blättern wird das sogenannte Panamastroh zur Herstellung der bekannten Hüte gewonnen. Während bis vor kurzem nur die fertigen Hüte importiert wurden, kommen heute auch die jungen Blätter oder die bereits zugeschnittenen Streifen für die Hutfabrikation in Europa in den Handel.

Als Anhang mag hier noch das Stuhlrohr erwähnt werden, die dünnen kletternden Stämme der Rotangpalme (Calamus spec.) aus Hinterindien und dem Malaiischen Archipel. Die in schmalen Längsstreifen abgetrennten Rindenpartien liefern das Flechtmaterial für die Rohrstuhlsitze. Der übrigbleibende Zylinder ist das Stuhlrohrpeddig ein bekannter Rohstoff für die Korbmöbelindustrie.

4n) Stroh. Das Stroh unserer Getreidearten dient ebenfalls zur Herstellung von Geflechten, namentlich das italienische Weizenstroh, aus dem die bekannten Florentiner Hüte gemacht werden. Außerdem ist aber Stroh ein wichtiges Rohmaterial für die Papierfabrikation. Das Stroh, in erster Linie Roggenstroh, wird zu diesem Zwecke zerkleinert und mit Laugen unter Druck gekocht. Dabei werden alle Nichtzellulosestoffe zerstört und es bleibt ein Zellmaterial, das aus reiner Zellulose besteht, zurück. Dieses gibt noch gebleicht sehr gute und feste, weiße Papiere. In ähnlicher Weise verwendet man die Stengelabfälle der Zuckerrohrfabrikation (sogenannte Bagasse), Bambus- und Maisstengel, die Halme des Zacaton sowie manche andere Gräser.

4o) Seegras, Posidoniafaser. Die Blätter der an unseren Küsten verbreiteten Najadee Zostera marina L. liefert das als Polstermaterial bekannte Seegras. Eine nahe

Digitized by Google

verwandte Pflanze, Posidonia oceanica L., dient zu gleichen Zwecken im Mittelmeergebiet und liefert in ihren durch das Meer isolierten und zu Bällen verfilzten Fasern die sogenannten Meerbälle. Kürzlich hat man in Australien an den Küsten unter der Oberfläche große Lager solcher verwitterter Fasern, P. australis, gefunden und recht erfolgreiche Versuche in der Verarbeitung dieser Fasern mit Jute und Wolle gemacht.

4p) Vegetabilisches Roßhaar oder Tillandsiafaser. Diese in ihren Vegetationsorganen stark reduzierte und wie eine lange Bartflechte von den Bäumen herabhängende Bromeliacee des Südens der Vereinigten Staaten und der Tropen liefert bereits in natürlichem Zustande getrocknet ein als Roßhaarersatz sehr brauchbares Polstermaterial. Sie wird aber auch durch besondere Behandlung von den weichen äußeren Partien ihrer nur wenige Millimeter starken, schwach verzweigten Fäden befreit und kommt dann in den Eigenschaften und im Aussehen den gekrollten Roßhaaren sehr nahe. An den Verzweigungen ist sie sehr leicht von anderem Fasermaterial zu unterscheiden.

IV. Holzfasern.

Feine Holzspäne dienen schon seit langer Zeit zu Flechtarbeiten und zur Herstellung von Hüten, in Südeuropa die Hölzer von Pappel und Weide, in Japan das Holz eines Lebensbaumes, dessen Holzspan unter dem Namen Hinokibast für Flechtzwecke bei uns eingeführt wird. Insbesondere liefern aber heute die weicheren Hölzer von Tanne, Pappel, Weide u. a. das Zellmaterial für die Papierfabrikation und zwar entweder einfach mechanisch zerkleinert als Holzschliff oder aber nach weiterer chemischer Behandlung als Holzzellulose (auch kurz Zellulose genannt). Auch Versuche, die so gewonnene Holzfaser zu verspinnen, liegen bereits vor. Die Abstammung der Zellulose ist an den anatomischen Verschiedenheiten der einzelnen Hölzer sehr gut feststellbar.

V. Tannennadeln und Torffasern.

Die 10 und mehr Zentimeter langen Nadeln verschiedener Kiefernarten werden ähnlich wie die getrockneten Bestandteile der Torfmoose und des Torfes als Polstermaterial und neuerdings auch zu Spinnzwecken für gröbere und feinere Gewebe verwendet. Bei Geweben werden besonders die guten Eigenschaften dieser beiden Rohstoffe in sanitärer Hinsicht betont.

Literatur. **Ch. R. Dodge,** *A Descriptive Catalogue of Useful Fiber Plants of the World, including the Structural and Economic Classifications of Fibers. Washington 1897.* — **J. Wiesner,** *Fasern, in: Die Rohstoffe des Pflanzenreichs, II. Aufl., Leipzig 1900/03, Bd. II. S. 167 bis 463.* — **Fr. von Höhnel,** *Die Mikroskopie der technisch verwendeten Faserstoffe, II. Aufl. Wien und Leipzig 1905.* — **A. Herzog,** *Mikrophotographischer Atlas der technisch wichtigen Faserstoffe, 1. Pflanzliche Rohstoffe. München 1908.* — **P. Klemm,** *Handbuch der Papierkunde. Leipzig 1904.* — **W. Herzberg,** *Papierprüfung, III. Aufl. Berlin 1907.* — **A. Oppel,** *Die Baumwolle nach Geschichte, Anbau, Verarbeitung und Handel, sowie nach ihrer Stellung im Volksleben und in der Staatswirtschaft. Leipzig 1902.* — **Ch. W. Burkett und C. H. Poe,** *Cotton, its Cultivation, Marketing, Manufacture and the Problems of the Cotton World. London 1906.* — **G. Watt,** *The wild and cultivated Cotton Plants of the World. A Revision of the Genus Gossypium. London 1907.* — **F. H. Bowman,** *The Structure of the Cotton Fibre in its Relation to technical Applications. London 1908.* — **J. Frost,** *Flachsbau und Flachsindustrie in Holland, Belgien und Frankreich. Berichte über Landwirtschaft, herausgegeben vom Reichsamt des Innern, Heft 9. Berlin 1909.* — **T. Tammes,** *Der Flachsstengel, eine statistisch-anatomische Monographie. Naturk. Verh. Holl. Maatsch., VI, 4. Haarlem 1907.* — **H. A. Carter,** *Ramie (Rhea) China Grass, The new Textile Fibre. All about it. London 1910.* — **J. F. Royle,** *The Fibrous Plants of India with an account of the Cultivation and Preparation of Flax, Hemp and their Substitutes. London 1855.* — **K. Braun,** *Die Agaven, ihre Kultur und Verwendung mit besonderer Berücksichtigung von Agave rigida var. sisalana Engelm. Der Pflanzer, Bd. II, 1906. S. 209 bis 257 und 273 bis 304. Tanga, D. O. A.* — **R. Endlich,** *Der Ixtle und seine Stammpflanzen. Beihefte zum Tropenpflanzer, IX, S. 21 bis 284, 7 Abb. Berlin 1908.* — **M. Deslandes,** *Le Rafia, Exploitation Utilisation et Commerce à Madagascar. Paris 1906.* — **R. Endlich,** *Die Zacatonwurzel. Tropenpflanzer X, S. 369 bis 382, 8 Abb. Berlin 1906.*

A. Voigt.

Faujas de Saint-Fond

Barthélemi.

Er wurde am 17. Mai 1741 in Montélimart geboren, besuchte die Jesuitenschule in Lyon, war später avocat au parlement in Grenoble und ging 1777 nach Paris, wo er am naturwissenschaftlichen Museum eine Assistentenstellung erhielt. Zahlreiche geologische Reisen führten ihn durch ganz Frankreich. Die Alpen, Deutschland, Holland und England wurden von ihm bereist. Auf Verwendung von Buffon wurde er königlicher Kommissar der Bergwerke. 1797 wurde er Professor der Geologie am naturwissenschaftlichen Museum in Paris; er starb am 18. Juli 1819 auf seinem Landgut St. Fond in der Dauphiné.

Digitized by Google

In seinem Werke „Recherches sur les volcans éteints du Vivarais et du Velay" (1778) bewies er den vulkanischen Ursprung des Basaltes. Weiter schrieb er „Histoire naturelle de la Province de Dauphiné" (Grenoble 1781), „Minéralogie des volcans" (1784). Neben seinen Untersuchungen der Trappgesteine (Essai sur l'histoire naturelle des Roches de Trapp. Paris 1788) beschäftigte er sich auch mit paläontologischen Forschungen. Sein „Essai de Géologie" (Paris 1803) enthält neben Petrographie und Vulkanlehre auch eine Versteinerungskunde.

Literatur. *Biographie Universelle, Bd. 13, S. 419 bis 422.* — **M. Freycinet,** *Essai sur la vie et les ouvrages de Faujas de St.-Fond, Paris 1820.*

O. Marschall.

Favre
Pierre Antoine.

Geboren am 20. Februar 1813 in Lyon, gestorben am 17. Februar 1880 in Marseille. Er wurde 1843 Professor an der medizinischen Fakultät in Paris, 1851 Vorstand des chemisch-analytischen Laboratoriums an der École des arts et manufactures, von 1854 an war er Professor der Chemie an der Fakultät der Wissenschaften in Paris, zuletzt in Marseille. Gemeinsam mit Silbermann maß er Verbrennungswärmen; von ihm allein stammen Untersuchungen über die chemischen Verhältnisse der galvanischen Kette.

E. Drude.

Fechner
Gustav Theodor.

Geboren am 19. April 1801 in Groß-Särchen bei Muskau in der Lausitz, gestorben am 18. November 1887 in Leipzig. Er studierte seit 1817 in Leipzig, habilitierte sich da und wurde 1834 zum Professor der Physik daselbst ernannt. Diese Stelle bekleidete er bis 1839, wo ein schweres Augenleiden ihn zwang sie aufzugeben. Er wandte sich nunmehr der Naturphilosphie und Anthropologie zu und wurde nach seiner Genesung im Jahre 1843 zum Professor dieser Wissenschaften ernannt. Er ist als der Begründer der Psychophysik anzusehen. Seine physikalischen Arbeiten beschäftigen sich vorwiegend mit Galvanismus und elektrochemischen Prozessen. 1839 gab er die erste eingehende Theorie der Kontaktelektrizität. Fechner war ein eifriger Verfechter der physikalischen Atomlehre, die er besonders gegen die Angriffe der Philosophen nachdrücklich verteidigte.

Literatur. **Kuntze,** *Gustav Theodor F., Leipzig 1891.* — **W. Wundt,** *G. Th. F., Gedächtnisrede zum 100jährigen Geburtstag, Leipzig 1901.*

E. Drude.

Fehling
Hermann.

Er ist in Lübeck am 9. Juni 1812 geboren, in Stuttgart am 1. Juli 1885 gestorben, wo er nahezu 40 Jahre als Professor am Polytechnikum erfolgreich gewirkt hat. Zuerst Pharmazeut, dann Schüler Liebigs, widmete er sich namentlich organisch-chemischen Untersuchungen. Der Schwerpunkt seiner Experimentaluntersuchungen lag in der Ausarbeitung wertvoller Bestimmungsmethoden für die angewandte Chemie. Die nach ihm genannte Kupferlösung zur Ermittelung des Zuckers ist allbekannt und bewährt. Die Analyse von technischen Produkten des Bergbaus, von Mineralwassern und Nahrungsmitteln verdankt ihm manche Förderung. Literarisch war Fehling außerordentlich tätig bei Herausgabe von Lehrbüchern und namentlich des von Liebig und Wöhler begründeten Handwörterbuchs der Chemie. Sein Leben und Wirken ist in dem Nekrolog von A. W. Hofmann dargestellt (Ber. 18, 1811).

E. von Meyer.

Felsenmeere.

So nennt man die in Gebirgsländern nicht selten vorkommenden losen und unregelmäßigen Haufwerke von Felsblöcken, die ihre Entstehung der Verwitterung und Erosion oder Deflation verdanken (vgl. den Artikel „Verwitterung").

Fermat
Pierre.

Geboren am 17. August 1601 in Beaumont-de-Lomagne, gestorben am 12. Januar 1665 in Castres. Er war ein bedeutender Mathematiker, seine Forschungen erstrecken sich vorwiegend auf die Zahlentheorie; mit Pascal ist er als Begründer der Wahrscheinlichkeitsrechnung anzusehen; seine Methode der Maxima und Minima wurde grundlegend für die Differentialrechnung. Von seinen Arbeiten hat er nur wenig selbst veröffentlicht, doch ist vieles in den Werken von Pascal und den Briefen Descartes' enthalten.

Literatur. **Genty,** *L'influence de F. sur son siècle, Orléans 1784.* — **Taubiac,** *Fermat, Notice biographique, Montauban 1879.* — **P. Rey,** *Galerie biographique de personnes célèbres etc., Montauban.*

E. Drude.

Ferner.

Der in den Ostalpen gebräuchliche Ausdruck für Gletscher (vgl. den Artikel „Eis").

Digitized by Google

Fernphotographie.

Telautographie. Phototelegraphie. Fernsehen.

1. Telautographie: a) Kopiertelegraphen: α) Mit elektrochemischem Empfänger. β) Mit elektromagnetischem Empfänger. γ) Mit photographischem Empfänger. b) Fernschreiber. 2. Phototelegraphie: a) Reliefmethode. b) Selenmethode. c) Statistische Methode und Zwischenklischees. 3. Fernseher.

Die Fernphotographie umfaßt alle Methoden faksimiler Fernübertragung von Schriftzügen, Strich- und Halbtonbildern auf elektrischem Wege. Der Uebermittelung von Schriftzügen und Strichzeichnungen dienen die Kopiertelegraphen und Fernschreiber. Der Uebermittelung von Halbtonbildern die Phototelegraphie.

1. Telautographie. 1 a) Kopiertelegraphen. Bei diesen wird ein fertiges Schriftstück oder eine fertige Strichzeichnung punktweise übertragen. Die Zeichnung oder Schrift kann im Geber elektrisch leitend auf nicht leitendem Grunde, oder umgekehrt, dann erhaben oder vertieft auf glattem Untergrunde angefertigt sein. In den meisten Fällen wird das Geberbild auf eine biegsame Folie aufgetragen, welche um eine zylindrische Walze gelegt wird, welche rotiert. Auf der Walze gleitet der Geberstift, welcher sich langsam in der Längsrichtung der Walze verschiebt, dadurch tastet der Geberstift, die Walze in engen Schraubenlinien ab. Der Empfänger zeigt die gleiche Bauart. Ist die Schrift elektrisch leitend auf isolierendem Untergrunde oder umgekehrt, so bildet der Geberstift einen Teil des Linienstromkreises, der durch die Schrift jeweils geschlossen oder unterbrochen wird. Bei vertieften oder erhabenen Strichen ist der Geberstift als Fühlhebel ausgebildet, der den Linienstrom mittels Kontaktes schließt und öffnet. Die entstehenden Stromstöße, welche den einzelnen Bildpunkten entsprechen, können im Empfänger auf folgende Weise in sichtbare Zeichen verwandelt werden.

1. Der Linienstrom geht durch den Empfangsstift, durch die Empfangsfolie zur Walze, und ruft auf der Folie infolge chemischer Präparation derselben eine Färbung hervor.

2. Die Stromstöße betätigen durch einen Elektromagneten direkt oder mit Hilfe eines Relais einen Schreibestift.

3. Durch die Stromstöße werden Lichtwirkungen erregt oder beeinflußt, die auf einem lichtempfindlichen Papier Zeichen hervorrufen.

Da es sich bei allen diesen Uebertragungen darum handelt, die Zeichen des Gebers im Empfänger in gleicher Weise aneinander zu reihen, ist eine synchrone Bewegung von Walze und Stift im Geber und Empfänger erforderlich. Bei den gegenwärtig in Verwendung stehenden Apparaten kommt durchaus das von D'Arlincourt 1868 erfundene Verfahren zur Anwendung. Das Prinzip desselben beruht darauf, daß man einen der beiden Zylinder, den Geber oder den Empfänger, etwas rascher rotieren läßt. Nach jeder Umdrehung wird der rascher laufende Zylinder durch ein Gesperre so lange aufgehalten, bis der langsamer laufende nachgekommen ist. In dem Augenblicke, in welchem beide Zylinder in der gleichen Lage stehen, erregt der langsamere Zylinder einen Stromstoß in der Leitung, durch welchen der schnellere Zylinder freigegeben wird, sodaß beide im gleichen Momente ihre Umdrehung beginnen.

α) Mit elektrochemischem Empfänger. Das erste Modell eines Kopiertelegraphen stammt von Blakewell (1848), dessen Geber heute noch Verwendung findet. Die Geberfolie besteht aus Stanniol, auf welches mit isolierender Flüssigkeit (Firnis usw.) geschrieben wird, oder es wird das Stanniol mit einer isolierenden Schicht überzogen und durch den Schreibstift das Stanniol bloßgelegt. Die Folie wird auf einer rotierenden Walze (a Abb. 1) aufgezogen, auf welcher der Stift b gleitet, der letztere wird durch eine Schraubenspindel bei einer Umdrehung der Walze um eine Ganghöhe in der Längsrichtung der letzteren verschoben. Der Linienstrom geht von der Batterie B durch den Stift b und die Folie, zur Walze a und durch deren Achse c zur Erde (Fernleitung). Ein Strom kann nur dann fließen, wenn die Folie an der Stelle, wo sie gerade vom Stifte berührt wird, leitend ist. Der Empfänger Blakewells war elektrochemisch, indem das Empfangspapier mit einer Lösung von Wasser, Salzsäure und Zyankalium getränkt war. Blakewell wie auch manche Erfinder nach ihm verwendeten zur Erzielung synchronen Ganges eine „guide line". Es wird auf der Geberfolie unabhängig von der zu übertragenden Zeichnung ein gerader Strich gezogen, der sich bei Synchronismus im Empfänger als Gerade reproduzieren muß, daher eventuell zur Korrektur des Synchronismus verwendet werden kann.

Die Anwendung der Schrift im Geber als Relief findet sich bei den Kopiertelegraphen nur vereinzelt, so bei Sawyer (1877), der das Relief lediglich durch Aufdrücken des Schreibstiftes auf eine solche Unterlage erzeugte. Auch die elektromagnetischen Empfänger findet man selten, da die Trägheit derartiger Anordnungen bei weitem größer ist, als die elektrochemischer oder photographischer Empfänger. Man kann im Maximum 200 bis 250 Stromströme pro Sekunde registrieren. Dagegen sind die

Digitized by Google

erforderlichen Stromstärken geringer als bei den chemischen Empfängern, welche ca. 0,03 A erfordern.

β) Mit elektromagnetischem Empfänger. Im Prinzipe elektromagnetisch ist die Anordnung Carbonelles, welcher im Geber ein Reliefbild verwendet, welches Stromschwankungen eines Mikrophons erzeugt. Im Empfänger wird durch die Stromstöße eine Telephonmembrane in Schwingungen versetzt, welche durch einen Stift und unterlegtes Kohlepapier eine Schwarz-Weiß-Zeichnung erzeugt.

γ) Mit photographischem Empfänger. Die größten Erfolge erzielte bis jetzt Korn mit seinem photographischen Empfänger (Fig. 1). Korn benutzt den Geber von

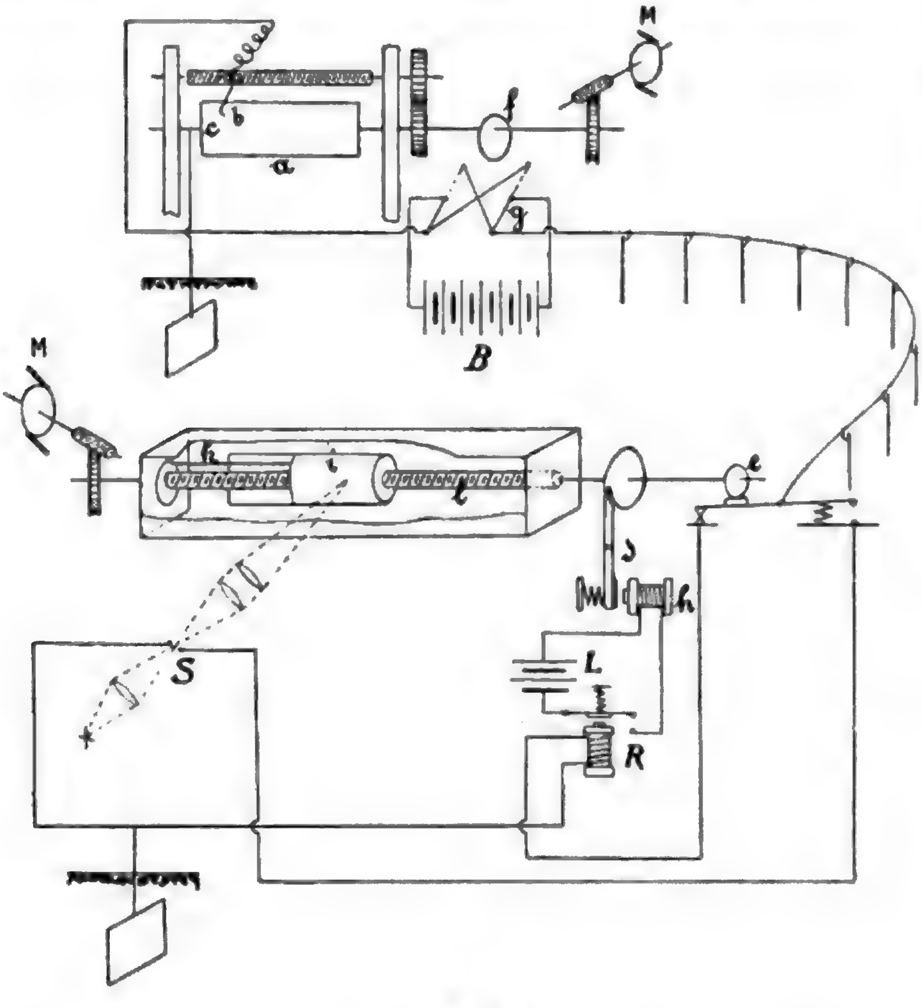


Fig. 1.

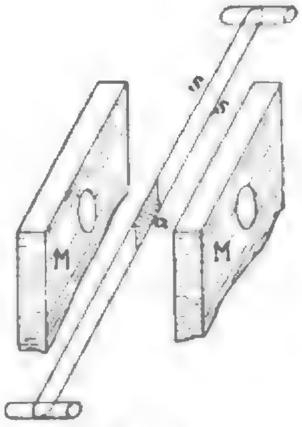


Fig. 2.

Blakewell, auf der Empfangsstation verwendet er ein Lichtrelais, welches der Hauptsache nach aus einem Saitengalvanometer besteht (Fig. 2). Zwischen den Schenkeln eines starken Elektromagneten (M) werden frei durchgehend zwei dünne Metallfäden oder Bänder S gespannt. Je nach den Strömen, die durch diese Drähte gehen, werden sie auf- oder abwärts bewegt. In der Mitte kann durch eine Bohrung der Magnete Licht von einer beliebigen Quelle hindurchtreten, wenn es nicht von einem an den Drähten befestigten Aluminiumblättchen a abgehalten wird. In der Mittellage der Drähte werden alle Lichtstrahlen abgeblendet, geht der Linienstrom durch die Drähte, so können alle Lichtstrahlen durchtreten. Figur 3 zeigt die Anordnung des optischen Systemes. a ist eine Nernstlampe, durch den Kondensor b werden die Strahlen auf das Aluminiumblättchen des Saitengalvanometers c konzentriert. Die Linsen d und e konzentrieren das Licht in Form eines Punktes auf den Empfangsfilm f. Zur Herstellung des Synchronismus verwendet Korn das D'Arlincourtsche Prinzip, welches von ihm am vollkommensten durchgebildet wurde. Geber und Empfangszylinder werden durch Gleichstrom-Nebenschlußmotore M angetrieben. Zur Bestimmung der Tourenzahl der Motoren bedient man sich abgestimmter Federn, welche bei der entsprechenden Tourenzahl des Motores in Schwingungen geraten, ähnlich wie bei dem Frequenzmesser von Hartmann und Braun. Man kann dadurch die Tourenzahl auf $^1/_4$% genau einstellen. Der Empfangszylinder läuft etwas schneller als der Geberzylinder und wird nach jeder Umdrehung durch den Hebel d aufgehalten, gleichzeitig wird durch den Exzenter e der Linienstrom vom Saitengalvanometer S ab- und auf das polarisierte Relais R umgeschaltet, bringt dieses jedoch nicht zum Ansprechen, da es entgegengesetzt polarisiert ist. In dem Momente, wenn der Geberzylinder nachgekommen ist, betätigt er durch Exzenter f den

Digitized by Google

Umschalter g, und es wird ein Stromstoß verkehrter Richtung auf das Relais R zur Wirkung kommen; dieses spricht an, schließt die Lokalbatterie L und der Magnet h zieht den Hebel d an, welcher den Empfangszylinder i freigibt. Der Empfangszylinder wird vom Motor nur durch Reibung mitgenommen. Er erhält eine drehende Bewegung durch Scheibe und Mitnehmerstift k, eine Längsverschiebung durch die Schraubenspindel l. Naturgemäß muß der Zylinder sich in einem lichtdichten Kasten befinden.

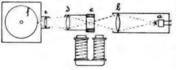


Fig. 3.

Thorne Baker verwendet den Synchronismus Korns mit einem elektrochemischen Empfänger (Fig. 4). Eine Eigentümlichkeit

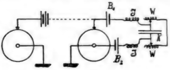


Fig. 4.

ist die Einschaltung von Gegenbatterien B_1B_2, Kapazität K, Selbstinduktion J und Ohmschem Widerstand W, wodurch die Wirkung sehr verbessert werden konnte. Als Gebebilder werden von Korn und Baker meist eigens hergestellte Rasterklischees verwendet, wenn es sich nicht um Strichzeichnungen handelt.

Fig. 5.

Mit dem Verfahren von Korn und Baker wurden vom „Daily Mirror“ zahlreiche Bildübertragungen auf den Linien Paris—Manchester—London vorgenommen. Im ganzen erwies sich das Kornsche Verfahren überlegen, da sich bis 1500 Zeichen pro Sekunde bei nur 0,01 Amp. Stromstärke übertragen lassen, während das Verfahren von Baker nur 300 Zeichen pro Sekunde bei 0,04 Amp. zuläßt. Fig. 5 zeigt eine telautographische Uebertragung von Korn zwischen Monte Carlo und Paris vom April 1912. Uebertragungszeit 15 Minuten.

1b) Fernschreiber. Bei diesen erfolgt die Uebertragung von Schriftzügen (Zeichnungen kommen hier kaum in Frage) in der Weise, daß die Bewegung des Schreibstiftes im Geber, eine kongruente Bewegung des Empfängerstiftes auslöst, also direkt die Schreibtätigkeit in die Ferne übertragen wird. Die Bewegung des Geberstiftes wird in zwei Komponenten zerlegt, deren jede nach ihrer Größe verschieden starke Stromimpulse (quantitative Komponenten) oder eine verschiedene Zahl gleichstarker Stromimpulse (pulsierende Komponenten) zur Empfangsstation sendet, woselbst die Umwandlung der Impulse in mechanische Bewegung und die Zusammensetzung zur resultierenden Bewegung erfolgt.

Die ersten praktischen Erfolge erzielte Elisha Gray (1888) mit pulsierendem Sender (Fig. 6). Am Geberstift a sind 2

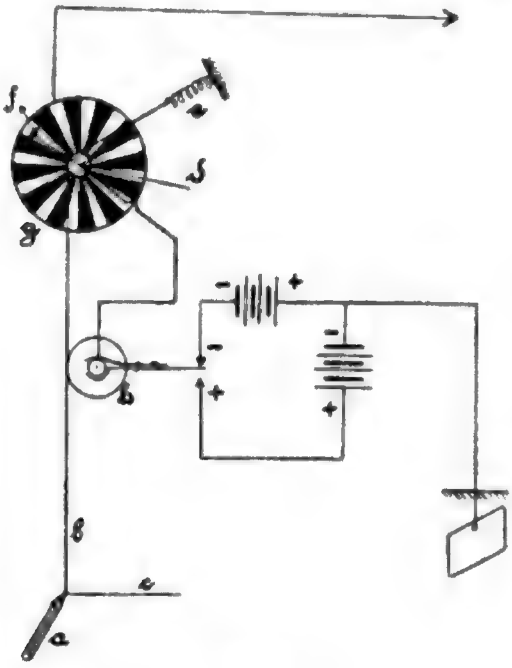


Fig. 6.

Schnüre b und c befestigt, welche die Welle d (in den Figuren 6 und 7 ist nur die Hälfte des Gebers und Empfängers gezeichnet, der andere Teil ist identisch gebaut) entgegen der Spannung der Feder e drehen; mit der Welle dreht sich der Kontakt f auf der Scheibe g, welche mit isolierenden Streifen, wie ein Kommutator, versehen ist. Je größer die Bewegung der Schnur ist, eine um so größere Zahl von isolierenden Lamellen muß f passieren und desto mehr Stromstöße werden in die Linie geschickt. Bei h ist eine Vorrichtung, „prony brake“ genannt, angebracht, welche je nach der Bewegungsrichtung der Schnur Impulse verschiedener Polarität herbeiführt, und in

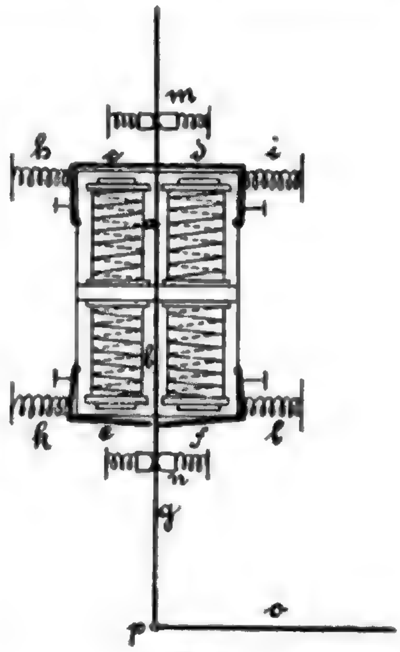


Fig. 7.

ihrer Art für alle ähnlichen Apparate vorbildlich geworden ist. Die Schnur ist um eine Welle geschlungen, welche durch Reibung einen Arm mitnimmt, der durch Anlage an 2 Kontakte die Stromrichtung umkehrt.

Zu jeder Komponente gehören im Empfänger (Fig. 7) 2 Elektromagnete a und b. Die Magnetanker cd und ef nehmen die durchlaufende Stange g nur mit, wenn sie durch einen Stromimpuls gegen den Magnet gezogen werden, hört der Impuls auf, so kommen die Federn h, i, k, l zur Wirkung und die Anker lassen die Stange frei, die infolge der Bremsen m, n ruhig bleibt. An den Stangen g und o ist der Empfangsstift p befestigt. Die Magnete werden durch eine Lokalbatterie betätigt, und der Schluß derselben erfolgt durch polarisierte Relais infolge der vom Sender ausgehenden Stromstärke, je nach der Stellung des „prony brake“.

Die Erfindungen Grays wurden praktisch verwendet. Jedoch wurden sie später von den quantitativen Komponentensendern verdrängt, von denen die Konstruktion von Tiffany und Ritchie die hervorragendsten sind. Tiffany (Fig. 8) verbindet mit dem

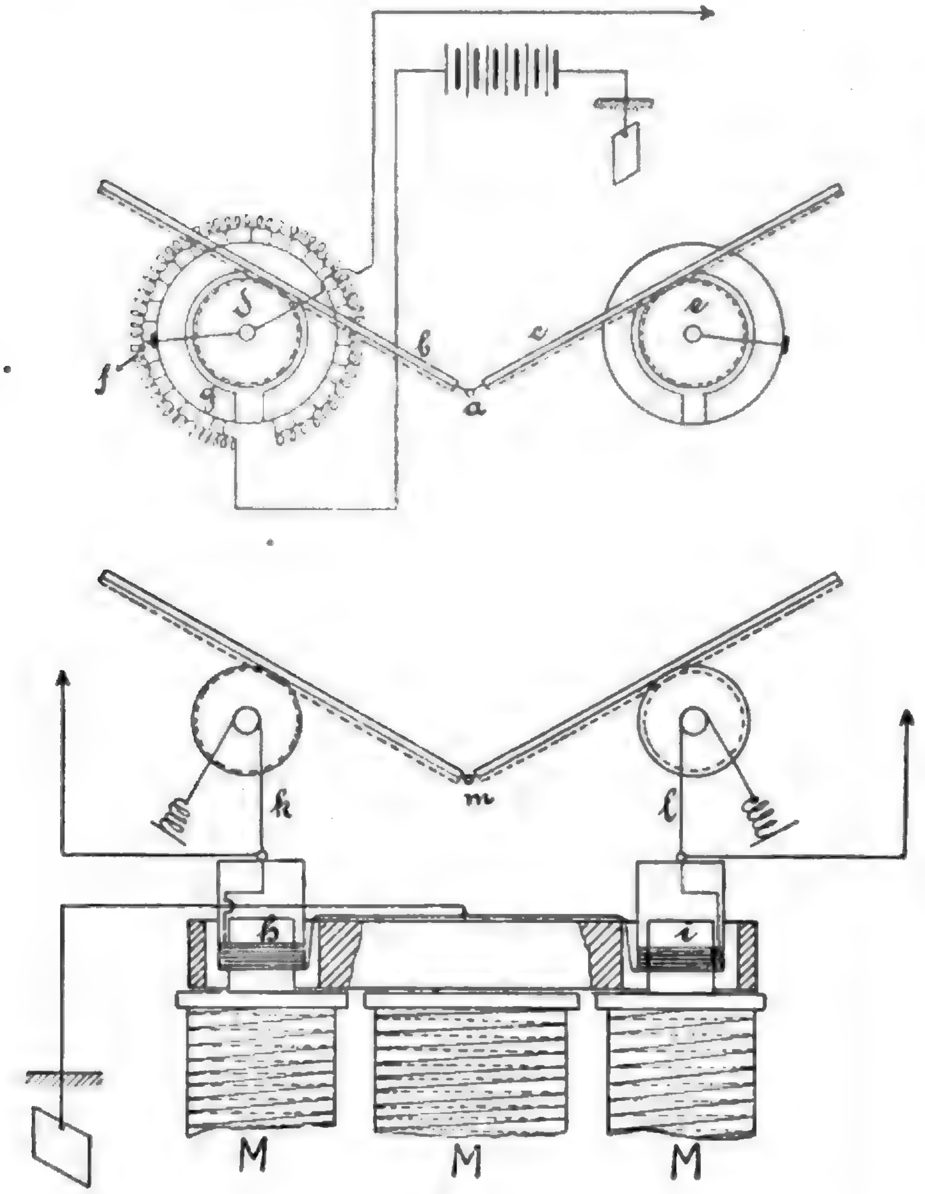


Fig. 8.

Geberstift a 2 Zahnstangen b und c, welche 2 Zahnräder d und e in Drehung versetzen. Mit den Zahnrädern bewegt sich eine Bürste f auf einer Kontaktscheibe g, wodurch verschiedene Widerstände und damit verschiedene Ströme in die Linie geschaltet werden. In der Empfangsstation gehen diese Ströme durch 2 Spulen h und i, welche in dem Felde eines sehr starken Elektromagneten M den Strömen proportionale Bewegungen ausführen. Die Bewegungen der Spulen werden durch Schnüre k und l, Zahnräder und Zahnstangen auf den Empfangsstift m übertragen. Beim Telewriter von Ritchie sitzt der Geberstift am Vereinigungspunkt zweier Gelenkhebel. Diese entsenden durch Einschaltung verschiedener Widerstände ähnlich wie beim Apparate von Tiffany quantitative Komponenten. Im Empfänger sind (Fig. 9) zwei gleiche Gelenkhebel vorgesehen, welche ähnlich den Zeigern von Drehspulgalvanometern betätigt werden. Die ankommenden Ströme fließen nämlich durch Spulen a und b, welche sich in einem starken Magnetfelde bewegen. Beide Hebel bestimmen die Bewegung des Empfangsstiftes c. Diese Anordnung wurde von der National Telewriter Company in London in den praktischen Betrieb eingeführt. Von anderen Konstruktionen wäre noch der mit photographischer Registrierung arbeitende Grzannagraph zu erwähnen. Derselbe ist ebenfalls ein quantitativer Komponentensender. Im Empfangsapparat

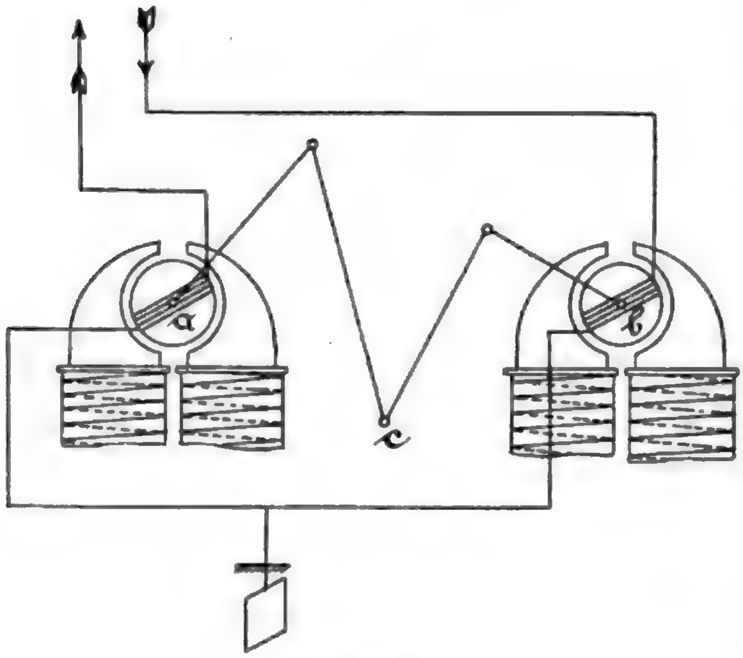


Fig. 9.

Digitized by Google

wird von den Komponenten je ein Spiegelgalvanometer zum Ausschlage gebracht, so daß der Lichtstrahl einer beliebigen Lichtquelle, von einem Galvanometer auf das andere reflektiert, eine zusammengesetzte Bewegung auf der lichtempfindlichen Schreibfläche ausführt.

Für Uebertragungen in Städten, also auf kurze Distanzen, haben sich die Fernschreiber gut bewährt, dagegen sind für Fernübertragung die Kopiertelegraphen weit überlegen.

2. Phototelegraph. Während es sich bei der Telautographie lediglich darum handelt, pro Bildpunkt einen Stromstoß konstanter Stärke im Empfänger zu erzeugen, muß bei der Uebertragung von Halbtonbildern ein

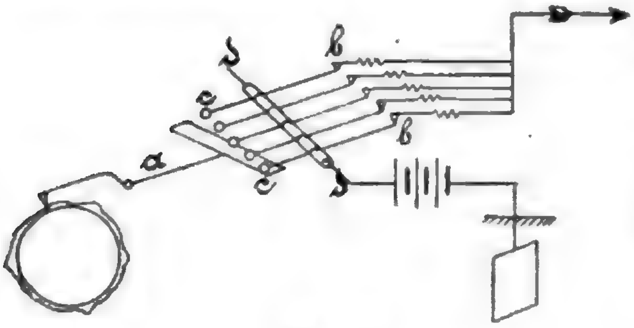


Fig. 10.

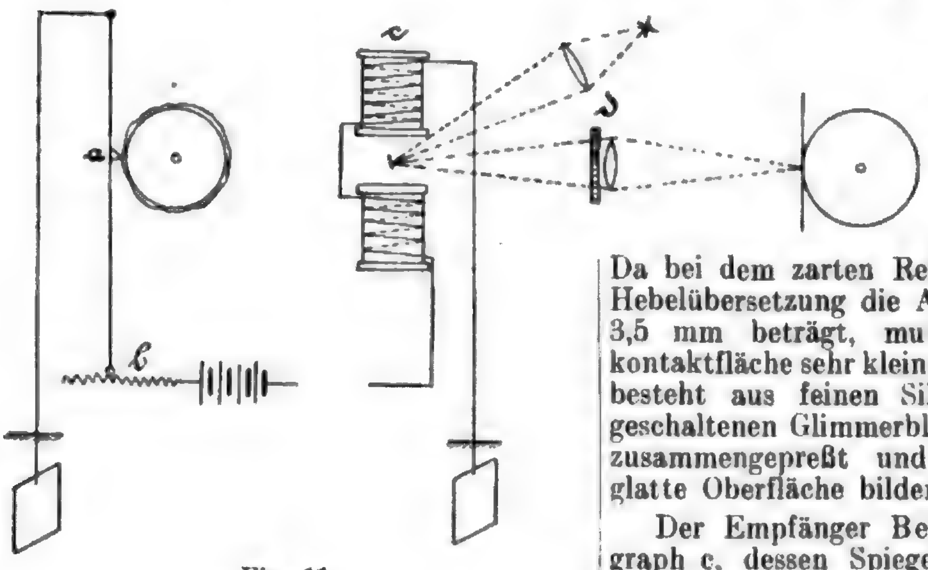


Fig. 11.

der Deckung des Originalbildes an der übertragenen Stelle proportionaler Stromstoß hervorgerufen werden. Es lassen sich hier 3 Methoden unterscheiden. 1. Man verwendet im Geber ein Reliefbild oder 2. ein Halbton-Diapositiv oder -Negativ mit einer Selenzelle. Die 3. Methode, die statistische genannt, nimmt eine Mittelstellung zwischen Telautographie und Phototelegraphie ein.

2a) Die Reliefmethode. Bei der Reliefmethode verwendet man im Geber ein Reliefbild, zu dessen Herstellung der Chromatgelatineprozeß in hervorragender Weise geeignet ist. Dieses Reliefbild wird, wie bei den Kopiertelegraphen beschrieben, um den Geberzylinder gelegt und durch einen Stift in feinen Schraubengängen abgetastet. Die Schwankungen des Stiftes, der dem Relief folgt, werden in verschiedener Weise in elektrische Impulse umgesetzt.

Amstutz ordnet eine größere Zahl von Widerstandskontakten c in schräger Richtung gegenüber dem horizontalen Fühlhebel a (Fig. 10) an, so daß, je höher der freie Arm des Fühlhebels a gehoben wird, desto mehr von den um die Achse d drehbaren Kontaktarmen von ihren Kontakten bei b abgehoben und desto größere Widerstände in die Leitung eingeschaltet werden.

Bei seinem neueren Verfahren wird durch den Fühlhebel ein Kontakt gehoben oder gesenkt, welcher auf einer rasch rotierenden vertikal angeordneten Trommel schleift. An der Trommel ist ein Widerstandskontakt in Form eines Dreiecks befestigt, so daß je nach der Lage des verschiebbaren Kontaktes längere oder kürzere Stromimpulse in der Leitung erzeugt werden. Der Empfänger ist elektromagnetisch ausgeführt und betätigt einen Stichel, der in eine weiche Masse graviert. Belin (Fig. 11) verwendet das Relief in der Weise, daß das freie Ende des Geberstiftes a über eine Zahl von Kontakten b gleitet, wodurch verschiedene Widerstände in die Leitung geschaltet werden. Da bei dem zarten Relief trotz der großen Hebelübersetzung die Auslenkung höchstens 3,5 mm beträgt, muß die Widerstandskontaktfläche sehr klein gehalten werden. Sie besteht aus feinen Silber- und zwischengeschaltenen Glimmerblättchen, welche stark zusammengepreßt und abgeschliffen, eine glatte Oberfläche bilden.

Der Empfänger Belins ist ein Oszillograph c, dessen Spiegel durch die Stromstöße proportional abgelenkt wird. Durch Zwischenschaltung eines von einem Ende zum andern das Licht immer stärker absorbierenden Lichtfilters d wird die Menge des hindurch gelassenen Lichtes je nach der Ablenkung variieren. Die Lichteindrücke werden photographisch registriert. Bei seinen neueren Konstruktionen verwendet Belin im Geber die Stromschwankungen eines Mikrophons. Die Synchronismus-Einrichtung ist mit der Kornschen identisch.

2b) Die Selenmethode. Die größte praktische Anwendung haben die photo-

Digitized by Google

telegraphischen Methoden gefunden, welche mit Selen im Geber arbeiten.

Das Selen hat in seiner graukristallinischen Modifikation B die Eigenschaft, seinen elektrischen Leitwiderstand bei Belichtung zu verringern. Da es jedoch einen sehr hohen spezifischen Leitwiderstand besitzt, bringt man es für praktische Verwendungszwecke in die Form von Selenzellen, in welchen es möglichst große Oberfläche und möglichst großen Querschnitt bei kleiner Leiterlänge erhält. Dieselben bestehen aus einer isolierenden Unterlage (Steatit, Schiefer, Glas usw.), auf welche 2 parallele Drähte (Kupfer, Platin) in Schraubenwindungen gewickelt werden. Der Zwischenraum zwischen den Drähten wird mit Selen angefüllt. Figur 12 zeigt eine Selenzelle nach Bidwell, Figur 13 nach

Fig. 12.

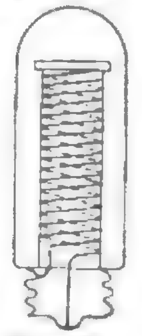


Fig. 13.

Clausen und Bronk, welche in eine luftleere Glasbirne montiert ist. Grippenberg benutzt als Elektroden feine Gitter aus Edelmetall, welche auf einer Glasplatte eingebrannt sind. Ein Nachteil bei Verwendung der Selenzellen für phototelegraphische Zwecke ist ihre Trägheit. Das Selen benötigt längere Zeit, um sich auf den einer bestimmten Belichtung entsprechenden Widerstand einzustellen. Eine oszillographische Aufnahme von Professor Glatzel (Abbildung 14) zeigt deutlich die Trägheit der Zelle (bei fehlender Trägheit müßte der Verlauf der Widerstandsänderung nach der gestrichelten Linie erfolgen). Die Trägheitserscheinungen

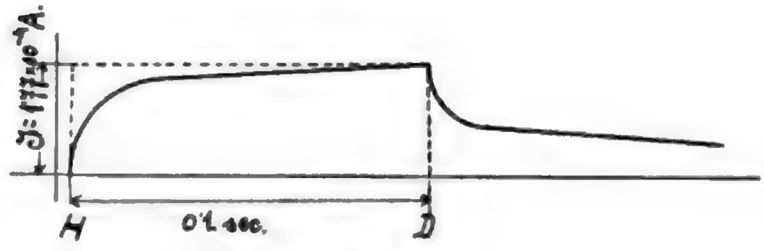


Fig. 14.

können durch die Kompensationsschaltung Korns auf ein Minimum reduziert werden. Bei derselben (Fig. 15) werden 2 Selenzellen die eigentliche Geberzelle S_1 und die Kom-

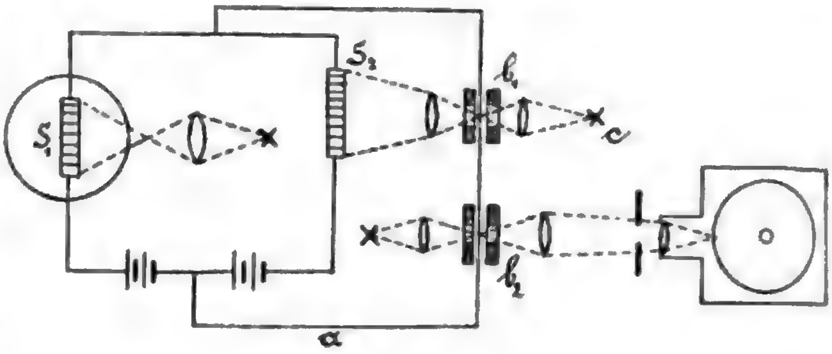


Fig. 15.

pensationszelle S_2 in den Zweigen einer Wheatstoneschen Brücke einander gegengeschaltet, so daß der Brückendraht a bei unbelichteten Zellen stromlos ist. Der infolge der Belichtung der Geberzelle erfolgende Stromstoß im Brückendrahte bringt das in denselben geschaltete Saitengalvanometer b_1 zur Ablenkung, welches seinerseits mit Hilfe der Lichtquelle c die Zelle S_2 belichtet, so daß der Brückendraht bei Aufhören der Lichteinwirkung auf S_1 sofort ohne Trägheitserscheinung wieder stromlos wird. Da das Empfangsgalvanometer b_2 in den Brückendraht geschaltet ist, also in Reihe mit dem Kompensationsgalvanometer, ist auch in diesem die Trägheit kompensiert. Figur 16 zeigt die von Glatzel oszillographisch aufgenommene kompensierte Trägheitskurve. Die Einstellung des Belichtungs- und Dunkelwiderstandes erfolgt fast momentan. Während alle anderen Versuche, phototelegraphische Uebertragungen mit Hilfe von Selen im Geber durchzuführen, an der Trägheit der Zellen scheiterten, gelang es Korn mit Hilfe seiner Kompensationsschaltung günstige Resultate zu erzielen. Auf dem senkrecht angeordneten Geberzylinder, welcher gleichzeitig eine rotierende und fortschreitende Bewegung erhält, ist der Bildfilm aufgezogen, welcher durch das Licht einer Nernstlampe in einem Punkte beleuchtet wird. Im Inneren des Zylinders befindet sich ein Prisma, welches das einfallende Licht auf eine am Boden des Zylinders befindliche Selenzelle reflektiert. Die Synchronismus- und Empfangsvorrichtung sind genau so gebaut wie beim Kornschen Telautographen. Da jedoch die Ablenkung des Saitengalvanometers nicht proportional der Stromstärke ist, wird zum Ausgleich hinter

Digitized by Google

das Saitengalvanometer eine Blende in Form der Figur 17 eingeschaltet. Die Kompensationszelle hat Korn in den Geber verlegt, welcher daher ebenso wie der Empfänger ein Saitengalvanometer erhält.

Die längsten Strecken, auf welchen

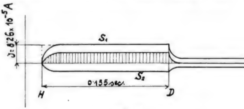


Fig. 16.

Fig. 17.

Bilder nach diesem Verfahren übermittelt wurden, waren Berlin—Paris und Paris—London. Figur 18 zeigt eine phototelegraphische Uebertragung von Korn zwischen München und Berlin vom Frühjahr 1908. Uebertragungszeit 12 Minuten. Tschörner in Wien (Fig. 19) verwendet im Geber einen Kontakt, der durch Selenzelle b und Elektromagnet c, oder mittels Reliefbildes und Taststift höher oder tiefer auf einem zylindrischen rotierenden in Form eines oder mehrerer Dreiecke angeordneten Schleifkontakte d eingestellt wird, wodurch längere oder kürzere Stromimpulse erzeugt werden. Die Stromimpulse betätigen auf der Empfangsstation einen Lichtschieber e. Das Licht einer konstanten Lichtquelle f trifft nun zuerst durch eine größere Oeffnung, dann durch eine kleinere Oeffnung die lichtempfindliche Schichte. Die Größenverhältnisse und die Entfernung der Oeffnungen werden nach der Rastergleichung bestimmt. Die Belichtungsvorrichtung stellt also eine kleine Rasterkamera vor. Das Halbtonoriginal des Gebers wird demnach auf der Empfangsstation als kopier- und ätzfähige Autotypie reproduziert.

Fig. 18.

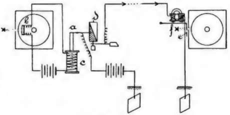


Fig. 19.

2c) Statistische Methoden und Zwischenklischees. Geringe Bedeutung kommt den statistischen Methoden zu, bei welchen den Tonungen der einzelnen Punkte entsprechende konventionelle Zeichen übermittelt werden, welche dann mittels eigener Schreibmaschine oder durch Handsatz reproduziert werden. Die Methode der Zwischenklischees verwandelt das Originalbild in eine den Tonungen entsprechende Kurve, welche dann mittels Kopiertelegraphen (Adamian) oder in konventionellen Zeichen (Fortong) übermittelt wird. Fortong führt das Bild mit Hilfe einer Selenzelle und eines Elektromagneten in ein gelochtes Band über, Adamian erzeugt mittels Selenzelle und eines Oszillo-

graphen eine Bildkurve, deren Ordinaten den Tonungen entsprechen. Auch diese Methoden haben wenig Verbreitung gefunden.

Was die drahtlose Fernübertragung von Halbtonbildern anbelangt, so liegen wirkliche Versuche noch nicht vor. Als interessanteste

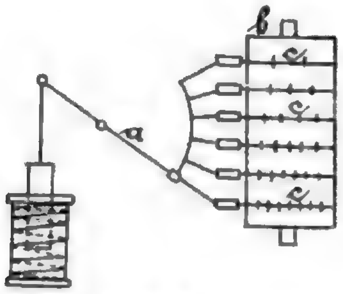


Fig. 20.

mag die Anordnung Fricarts (Fig. 20) Erwähnung finden. Die Stromschwankungen beeinflussen die Stellung eines Kontaktes a, welcher dadurch verschiedene Stellen des rotierenden Zylinders b in den Stromkreis schaltet. Da der Zylinder mit Reihen verschieden dicht gesetzter Kontakte c, welche den Kreis des Funkeninduktoriums schließen, versehen ist, wird eine größere oder kleinere Zahl von Kontakten bei einer Walzenumdrehung berührt, und dadurch eine größere oder kleinere Menge elektrischer Energie entsendet.

3. Fernsehen. Trachtet man die Uebertragung des Originales derart vorzunehmen, daß es im Momente der Uebertragung in der Empfangsstation dem Auge als einheitliches Bild sichtbar wird, so kommt man zum Probleme des elektrischen Fernsehens. Die Aussichten auf Verwirklichung sind derzeit recht gering. Ein Teil der Erfinder trachtet mit einer Leitung auszukommen, demnach das Bild in Punkten hintereinander zu übermitteln. Die gesamte Uebertragungszeit dürfte dann höchstens $^1/_{10}$ Sekunde (dies ist die Dauer der Nachbildwirkung) betragen. Für die Zerlegung des Bildes in Punkte wären folgende Vorschläge zu erwähnen. Le Blanc verwendet einen um 2 aufeinander senkrechte Achsen gleichzeitig schwingenden Spiegel, Szczepanik verwendet 2 senkrecht zueinander schwingende Linienspiegel, von denen der eine eine größere Schwingungsfrequenz besitzt. Es wird dadurch das Original in nach Schrauben- oder Zickzacklinien angeordnete Punktreihen zerlegt. Nipkow verwendet eine rotierende Scheibe mit einer Lochspirale, deren Ganghöhe gleich der Bildreihe, deren Lochentfernung gleich der Bildhöhe ist (Fig. 21). Weiller verwendet ein rotierendes Spiegelprisma mit gegen die Achse unter verschiedenen Winkeln geneigten Spiegeln, Majorana 2 gegeneinander rotierende Scheiben mit schrägen Schlitzen, von denen eine um ein vielfaches höhere Tourenzahl besitzt. Die Umwandlung der Licht- in elektrische Impulse erfolgt durch Selenzellen, Bolometer oder Thermosäulen. Die unüberwindlichen Schwierigkeiten bietet die

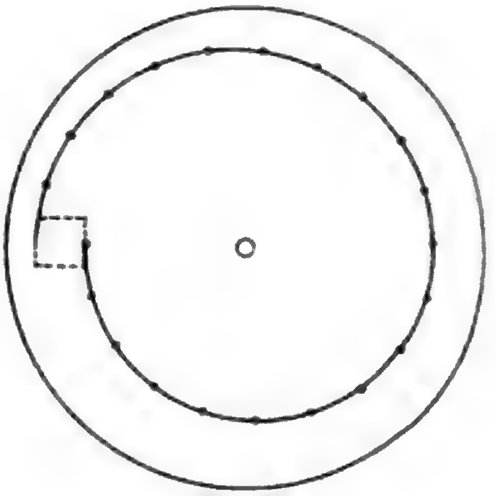


Fig. 21.

Synchronisierung und der Empfangsapparat. Hier dürften die trägheitsfreien Methoden, wie Ablenkung der Kathodenstrahlen durch Magnete, Drehung der Polarisationsebene im Magnetfelde am ehesten Aussicht auf praktische Verwendbarkeit besitzen.

Erwähnenswert wäre die Apparatur von Rosing, welcher nach dem Vorschlage von Glage und Dieckmann die Ablenkung der Kathodenstrahlen einer Braunschen Röhre im Magnetfelde verwendet. Die Bildzerlegung erfolgt durch 2 rotierende Spiegelprismen, durch eine lichtelektrische Zelle werden die Licht- in Stromimpulse verwandelt. Es ist also sowohl der Geber als auch der Empfänger trägheitsfrei.

Andere Erfinder verzichten auf den Vorteil einer einzigen Leitung und benutzen so viele Selenzellen, als das Bild Punkte erhält. Jede Zelle erzeugt bei Belichtung einen elektrischen Impuls, der für sich übertragen wird, so daß alle Bildpunkte in der Empfangsstation gleichzeitig erscheinen. Der erste derartige Vorschlag stammt von Senlecqu 1881. Lux will für jede Zelle Wechselströme verschiedener Periodizität verwenden, welche sich in einer Leitung ohne Störung überlagern können. Durch abgestimmte Federn erfolgt in der Empfangsstation die Trennung der Impulse. Weitere Vorschläge für Anwendung einer größeren Zahl von Leitungen stammen von Ruhmer und Liesegang. Die enormen Kosten der Leitungen lassen diese Richtung wenig aussichtsreich erscheinen.

Literatur. *Paul F. Liesegang. Die Fernphotographie. Düsseldorf 1897.* — *B. Schöffler,*

Digitized by Google

Die Photographie und das elektrische Fernsehen. Wien 1898. — **R. E. Liesegang**, *Beiträge zum Probleme des elektrischen Fernsehens. 2. Aufl. Düsseldorf 1899.* — **E. Ruhmer**, *Das Selen und seine Bedeutung für die Elektrotechnik. Mit besonderer Berücksichtigung der drahtlosen Telephonie. Berlin 1902.* — **A. Korn** *und* **B. Glatzel**, *Handbuch der Photographie und Telautographie. Leipzig 1911.* — **Eders** *Jahrbuch für Photographie und Reproduktionstechnik. Halle a. S. 1898 bis 1911.*

P. v. Schrott.

Feste Körper.

1. Kristallinische feste Körper: a) Definition. b) Thermische Ausdehnung. c) Kompressibilität. d) Dampfdruck. e) Oberflächenspannung. f) Kinetische Theorie der festen Körper. g) Gleichgewicht der festen Körper mit anderen Phasen. h) Einfluß der Korngröße. 2. Amorphe feste Körper. a) Amorphe homogene feste Körper als Flüssigkeiten mit großer innerer Reibung. b) Amorphe heterogene feste Körper als disperse Systeme.

1. Kristallinische feste Körper. 1 a) Definition. Die festen Körper zerfallen in die beiden Hauptklassen: kristallisierte und amorphe feste Körper.

Die kristallisierten Körper besitzen charakteristische Polyederformen (vgl. die Artikel „Kristallformen" und „Kristallographie"), welche für Stoffe, die ungleiche chemische Zusammensetzung besitzen, stets Differenzen in der Achsenlänge und oft auch in der Symmetrie aufweisen. Hingegen streben alle amorphen Körper — wenn sie sich selbst überlassen d. h. unbeeinflußt von ihrer Umgebung sind — eine und dieselbe Gestalt, nämlich Kugelform, anzunehmen.

Zur Definition der kristallisierten Körper kann auch ihre Eigenschaft dienen, daß ihr physikalisches Verhalten von der Richtung, längs welcher man sie prüft, abhängt. Z. B. ist die Härte des Minerals Cyanit, das stangenförmige Kristalle bildet, in der Längsrichtung der Stangen stark verschieden von der Härte in ihrer Querrichtung; schon durch Ritzen mit einer Eisennadel kann dieser Unterschied leicht festgestellt werden.

Man bezeichnet diese Abhängigkeit von der Richtung als „vektorielles Verhalten"; die physikalischen Eigenschaften der Kristalle besitzen also den Charakter von Vektoren.

1 b) Thermische Ausdehnung. Man hat zwischen der linearen und der kubischen Ausdehnung zu unterscheiden und man bezeichnet das Maß der Ausdehnung für die Temperatureinheit als „Ausdehnungskoeffizienten" und pflegt sowohl den kubischen als auch den linearen Ausdehnungskoeffizienten anzugeben (vgl. Landolt-Börnstein, physikalisch-chemische Tabellen). Es kann die kubische Ausdehnung als Gesamteffekt der in den verschiedenen Richtungen stattfindenden linearen Ausdehnung bezeichnet werden. Während für amorphe Körper die lineare Ausdehnung in allen Richtungen die gleiche sein muß, ist sie für Kristalle im allgemeinen verschieden in den verschiedenen Richtungen und kann sogar ihr Zeichen wechseln, d. h. es gibt Kristalle, die längs gewissen Richtungen sich ausdehnen und zugleich längs anderen Richtungen sich zusammenziehen.

Außerdem hängt der Ausdehnungskoeffizient von der Anfangstemperatur des betreffenden Körpers ab und es sind nicht nur unter den kristallisierten, sondern auch unter den amorphen und flüssigen Körpern solche Stoffe möglich, die bei Temperaturerhöhung in einem gewissen Temperaturintervall sich zusammenziehen, während sie außerhalb dieses Intervalls dem Verhalten der gewöhnlichen Körper folgen, welche sich bei Temperaturerhöhung ausdehnen.

Bei Kristallen drückt man die Abhängigkeit des Ausdehnungskoeffizienten von der Richtung folgendermaßen geometrisch aus: Man denkt sich aus dem betreffenden Kristall eine Kugel geschnitten und fragt: Welche geometrische Form nimmt die Kugel bei einer Temperaturänderung an? Man hat gefunden, daß sie stets in ein Ellipsoid übergehen muß und bezeichnet eine derartige Formänderung als „homogene Deformation".

Für hochsymmetrische Kristallsysteme kann das gesamte Ellipsoid kein dreiaxiges sein, sondern es spezialisiert sich im hexagonalen und tetragonalen System zu einem Rotationsellipsoid, im regulären System zu einer Kugel. Danach ist die Ausdehnung der regulären Körper ebenso beschaffen, wie diejenige der amorphen und flüssigen Körper

Die regulären Körper besitzen aber keineswegs für alle physikalischen Eigenschaften diese Unabhängigkeit von der Richtung, die für den Ausdehnungskoeffizienten zutrifft. Vielmehr sind z. B. die Größen, welche ihre Kohäsionseigenschaften bestimmen (vgl. die Artikel „Elastizität" und „Kristallphysik") in komplizierter Weise auch in regulären Körpern mit der Richtung veränderlich.

Die verschiedenen polymorphen Modifikationen eines Stoffes besitzen einen ungleichen Ausdehnungskoeffizienten, z. B. ist die durch Schmelzen von Quarz erzeugbare Modifikation der Kieselsäure (soge-

Digitized by Google

nanntes Quarzglas) dadurch charakterisiert, daß sie einen viel kleineren Ausdehnungskoeffizienten besitzt, als irgendein anderer gewöhnlicher Körper; für den kristallisierten Quarz ist die Größe der Ausdehnung aber keineswegs abnorm klein und überdies parallel zur Hauptachse verschieden von derjenigen, die er senkrecht zur Hauptachse besitzt. Dieser Unterschied der Richtungen fällt für das Quarzglas natürlich fort.

1c) Kompressibilität. Während den Physiker hauptsächlich die allseitige Kompression fester Körper interessiert, besitzt für die Naturprozesse auch der einseitig wirkende Druck Bedeutung.

Z. B. scheint die Bildung mancher geschieferter Gesteine durch sogenannte „Pressung", d. h. durch einen nicht allseitig wirkenden Druck, sich zu erklären. Es unterliegt offenbar unter anderem ein vom Erdinnern nach der Oberfläche vordringendes Gesteinsmagma einem von unten nach oben zu abnehmenden Druck.

Man ahmte durch künstlichen Druck die Bildungsprozesse von Glimmerschiefern und ähnlichen Gesteinen nach, indem man fand, daß in Lehm (u. dgl.) verteilte Glimmerplättchen sich durch künstlichen Druck ebenso in parallele Stellungen bringen lassen, wie dies unter den natürlichen Gesteinen beim Glimmerschiefer eingetreten ist.

Während allseitiger Druck nur bei sehr hoher Intensität die physikalischen Eigenschaften fester Körper ändert, äußern sich die Einwirkungen der Pressung bereits früher.

Eine interessante Folgerung über die Kompressibilität fester Körper hat F. Becke auf mineralogisch-petrographischem Gebiet gezogen. Aus dem Prinzip van't Hoffs über den Bewegungssinn des Gleichgewichts leitet F. Becke die Folgerung ab, daß durch Dynamometamorphose (vgl. die Artikel „Gesteinsstruktur" und „Mineral- und Gesteinsbildung, Metamorphose") eine solche Umwandlung der Mineralkomponenten zustande komme, daß die neuen Mineralien ein kleineres Molekularvolumen besitzen als die ursprünglichen Mineralkomponenten (als Molekularvolumen bezeichnet man den Quotienten aus Molekulargewicht und spezifischem Gewicht eines Stoffes).

Durch starke Druckwirkungen werden auch gewisse polymorphe Umwandlungen und Aenderungen der äußeren Eigenschaften von Mineralien erklärt. Beispiele für letzteres sind unter anderem die Umwandlung des Kalksteins in Marmor, des Augits in Diallag, für ersteres die Umwandlung des Augits in Hornblende.

Auch die Absonderungen, welche geschieferte Gesteine häufig in äußerst ausgeprägtem Maße zeigen, erklären sich durch den Widerstand gegen Kompression.

Einen geistreichen Gedanken zur Ausübung einer starken Kompression fester Körper hatte Moissan: er ging davon aus, daß die natürlichen Diamanten sich unter sehr starkem Druck aus gewöhnlichem Kohlenstoff gebildet haben. Um diese Bildungsweise nachzuahmen, suchte er die von anderen beschriebene Eigenschaft des Eisens, beim Erstarren sich auszudehnen, zu benutzen. Der in geschmolzenem Gußeisen gelöste Kohlenstoff scheidet sich beim Erstarren aus und die zentralen Teile einer im Erstarren begriffenen Eisenmasse müssen auf den dort sich ausscheidenden Kohlenstoff einen enormen Druck ausüben, da diese Teile in ihrer Tendenz, beim Festwerden ihr Volum zu vermehren, durch die Hülle des bereits erstarrten peripherischen Eisens behindert sind. Tatsächlich beobachtete Moissan die Bildung von winzigen, mikroskopischen Diamanten, doch ist es nicht sicher, daß diese durch Kompression sich gebildet haben, da spätere Beobachtungen die Annahme, daß das Eisen beim Erstarren sich ausdehne, wieder in Zweifel stellten.

Durch Kompression fester Körper wird eine Aenderung ihrer Symmetrie bewirkt: einseitig komprimierte reguläre Kristalle nehmen Eigenschaften an, die denen der einachsigen Kristalle nahekommen, besonders gilt dieses für die Doppelbrechung (vgl. die Artikel „Doppelbrechung", „Kristallphysik") und den Pleochroismus (vgl. den Artikel „Farbe"), welchen z. B. blaues Steinsalz durch Kompression erlangt.

Komprimierte einachsige Kristalle zeigen, wenn die Kompressionsrichtung nicht unsymmetrisch verläuft, die optischen Eigenschaften (Achsenbilder) zweiachsiger Kristalle. Interessant ist es, Quarzkristalle zu komprimieren, da sich vermuten läßt, daß alsdann die Achsenbilder denen der zweiachsigen Kristalle mit Drehungsvermögen entsprechen (vgl. Hauswaldt, Atlas der Interferenzerscheinungen im polarisierten Licht).

Auch durch plötzliche Abkühlung der peripherischen Teile fester Körper lassen sich ähnliche Strukturstörungen wie durch Kompression erzeugen. Hierauf beruht die Doppelbrechung rasch gekühlter Gläser und die Tendenz der sogenannten Glastränen zu Pulver zu zerfallen. Es zieht eben dieses rasche Abkühlung geradezu Kompressionswirkungen nach sich.

1d) Dampfdruck. Ebenso wie die Flüssigkeiten besitzen auch die festen Körper die Fähigkeit, so lange zu verdampfen, bis der Dampf eine von der betreffenden Temperatur abhängige maximale Dampfspannung erreicht hat. Eine Anzahl von Sätzen, die für den über Flüssigkeiten stehenden Dampf

Digitized by Google

gilt (vgl. den Artikel „Lösungen" S. 450ff.) läßt sich auch auf den Dampf fester Körper ausdehnen. Meist ist die maximale Dampfspannung fester Körper äußerst gering, und z. B. für die festen Riechstoffe (Moschus u. dgl.) ist sie auf keine andere Weise nachgewiesen worden, als eben durch den Geruch.

Die Sublimationsfähigkeit, welche viele Körper (z. B. Kampfer) noch bei recht tiefen Temperaturen besitzen, ist nur durch die Existenz eines gewissen Dampfdrucks erklärbar. Bei hohen Temperaturen sublimiert eine große Anzahl von Stoffen unterhalb ihres Schmelzpunkts zum mindesten in geringem Grade (Kohle im elektrischen Lichtbogen, Metalle in evakuierten Quarzglasgefäßen). Oft kommt eine Dissoziation der verdampfenden Moleküle fester Körper zustande (z. B. bei Salmiak).

Der maximale Dampfdruck über den verschiedenen Flächen eines Kristalls braucht nicht der gleiche zu sein; doch hat O. Lehmann geltend gemacht, daß diese Unterschiede nicht so weit gehen können, daß der Kristall auf Kosten der gleichen Moleküle, um welche er sich am einen Ende vermindert, am entgegengesetzten Ende wächst, denn dieses würde im Prinzip ein perpetuum mobile zu konstatieren gestatten. Es müssen sich also für die zwischen jeder Fläche und ihrer Gegenfläche liegenden Umgrenzungselemente derart die etwaigen Unterschiede der Dampfspannungen ausgleichen, daß der Satz von der Erhaltung der Energie gewahrt bleibt.

In der Natur kommt die Verdampfbarkeit fester Körper für die Bildung mancher Mineralien bei vulkanischen Prozessen in Betracht, und man hat beobachtet, daß oft gerade die bestausgebildeten Kristalle in solchen Fällen aus Dämpfen entstanden sind (vgl. den Artikel „Mineral- und Gesteinsbildung", S. 928 und 943).

Ferner ist bemerkenswert die Vollkommenheit der Kristalle, welche aus verdampfendem Jod sich an den kälteren Partien des Versuchsgefäßes abscheiden.

Da wo diese Verdampfbarkeit leicht durchführbar ist, findet sie praktische Anwendung zur Reinigung der betreffenden Chemikalien (z. B. resublimierte Pyrogallussäure und resublimiertes Jod).

1e) Oberflächenspannung. Ebenso wie die Flüssigkeiten besitzen auch die festen Körper eine Oberflächenspannung, die an den Grenzflächen zwischen dem festen Stoff und dem umgebenden Mittel, aus welchem er entsteht, sich betätigt. Während bei amorphen Körpern wegen der Gleichwertigkeit aller Richtungen die Oberflächenspannung zu einer kugelförmigen Umgrenzung führt, kann bei Kristallen die Oberflächenspannung in verschiedenen Richtungen verschieden sein.

Meist stellt man sich vor, daß bei der Bildung eines Kristalls die einzelnen Richtungen, wenn sie als Kräfte aufgefaßt werden, durch Bildung der auf ihnen senkrechten Flächen sich betätigen und hat alsdann auch eine Verschiedenheit der Oberflächenspannung längs den einzelnen Flächen anzunehmen. Diese können entweder natürliche Umgrenzungsflächen oder künstlich angeschliffene Flächen sein. Curie hat das Prinzip aufgestellt, daß bei dem Wachstum eines Kristalls diejenigen Flächen, für welche die Oberflächenspannung den kleinstmöglichen Wert besitzt, sich vorzugsweise ausbilden, daß die anderen Flächen verschwinden. Es wäre dann das Wachstum eines Kristalls etwa mit demjenigen einer Seifenblase vergleichbar, während letztere wegen der Oberflächenspannung stets die Kugelform beibehält, bewahrt der Kristall stets diejenige Form, welche aus dem Minimumprinzip der Oberflächenspannung bei gegebenem Volum dann folgt, wenn man die anisotropen Bildungskräfte des Kristalls mit berücksichtigt. Ueber letztere ist aber leider wenig mehr als ihre Symmetrie bekannt.

Anhangsweise sei in diesem Abschnitt noch erwähnt, daß Tropfen, welche auf einer Kristallfläche sich befinden, nicht kreisförmige, sondern im allgemeinen Fall elliptische Grundflächen annehmen; die Achsen der Ellipsen entsprechen dem Maximum und Minimum der Oberflächenspannung, die zwischen Kristallfläche und Tropfen besteht. Man hat hieraus Folgerungen über die Struktur der Kristalle (vgl. den Artikel „Raumgitter") abgeleitet.

Das Wachstum der Kristallflächen und ihre Auflösung sind unter gewöhnlichen Verhältnissen nicht als umkehrbare Prozesse im Sinne der Thermodynamik aufzufassen. Bei der Auflösung eines Kristalls bilden sich zwar auch Formen von genau bestimmtem Umriß, aber sie besitzen nicht ebene Flächen, sondern charakteristische Wölbungen. Diese von Rauber sehr genau experimentell studierten „Lösungskörper" weisen zwar Gesetzmäßigkeiten auf, die mit der Oberflächenspannung im Zusammenhang stehen müssen, aber sie und ebenso die Aetzfiguren (vgl. die Artikel „Aetzfiguren", „Kristallographie" und „Kristallchemie") bieten doch der theoretischen Erklärung vom Prinzip der minimalen Oberflächenspannung aus große Schwierigkeiten.

1f) Kinetische Theorie der festen Körper. Da die Gestalten der Moleküle und die zwischen ihnen herrschenden Kräfte für feste Körper viel komplizierter sind als für die Moleküle der Gase und Flüssig-

Digitized by Google

keiten, hat die kinetische Theorie der festen Körper weniger Erfolge aufzuweisen, als diejenige der anderen Aggregatzustände und es lassen vorzugsweise solche Sätze sich für feste Körper kinetisch veranschaulichen, die auch thermodynamisch beweisbar sind.

Man hat wohl öfters behauptet, daß zwischen der kinetischen Theorie der festen Körper und der Raumgittertheorie (vgl. den Artikel „Raumgitter“) ein unvereinbarer Gegensatz bestehe. Jedoch trifft dieses nicht zu, sobald man sich die Formelemente eines Raumgitters nicht als starre Materie, sondern als die Wirkungskreise der materiellen Teilchen vorstellt, derart, daß diese innerhalb ihrer Wirkungssphäre sich in einer beliebig lebhaften Bewegung befinden können, deren Zentrum im betreffenden Knotenpunkt des Raumgitters zu suchen ist. Alsdann verschwindet jeglicher Widerspruch zwischen der kinetischen Theorie und der Strukturtheorie der festen Materie.

Im übrigen entfaltet sich die Leistungsfähigkeit dieser beiden Theorien auf ganz verschiedenen Gebieten: die Strukturtheorie liefert ihrer sehr allgemeinen Annahme wegen meist nur qualitative Resultate, die nur selten auf Gesetze, sondern mehr auf Klassifikationen hinführen und im wesentlichen nur die Symmetrie der festen Körper betreffen; die kinetische Theorie zwingt sogleich zur Spezialisierung der Grundhypothesen und liefert mittels des Calculs quantitative Resultate, welche durch die Folgerungen der Strukturtheorie, die stets geometrischer Natur sind, nur ergänzt werden.

1g) Gleichgewicht von festen Körpern mit anderen Phasen. Vorzugsweise die Phasenlehre (vgl. den Artikel „Phasenlehre“) in Verbindung mit den Diagrammen und Modellen der Gleichgewichtskurven und -flächen ist vom physikochemischen Gesichtspunkt aus für die festen Körper von Wichtigkeit. Die für die flüssigen Körper enorme Erfolge aufweisende Theorie der Lösungen bietet bei Auffassung der Mischkristalle als „fester Lösungen“ (vgl. den Artikel „Lösungen“ S. 459) Anwendungen auf den kristallinischen Zustand.

Diese Analogie gilt deshalb, weil Mischkristalle als homogene Phasen im Sinne der Phasenlehre aufzufassen sind, so daß die Lösung eines Mischkristalls in Wasser ganz analog z. B. mit dem Verdampfen von verflüssigter Luft (d. h. eines Gemisches von Sauerstoff und Stickstoff) ist. Charakteristisch und gemeinsam ist beiden Fällen der Umstand, daß die flüssige Phase im allgemeinen eine andere Zusammensetzung hat als die mit ihr im Gleichgewicht stehende Phase: Man erhält über einer Flüssigkeit, deren Zusammensetzung der gewöhnlichen Luft gleichkommt, ein Gas, welches an Sauerstoff reicher ist, als gewöhnliche Luft; und analog erhält man bei Lösung eines Mischkristalls das Resultat, daß die leichter lösliche Komponente sich stärker aus dem Mischkristall herauslöst als die schwächer lösliche Komponente. Es verschiebt sich also der relative Prozentgehalt der beiden Komponenten zueinander während des Lösungsvorganges. Lösungstension und Dampfspannung sind folglich analog.

Die Uebertragung der Lehre vom Gleichgewicht (vgl. den Artikel „Chemisches Gleichgewicht“) auf Doppelsalze und polymorphe Umwandlungen bietet keinerlei Schwierigkeiten, hingegen gelten für die Adsorptionen kompliziertere Regeln, da sich die Menge des adsorbierten Körpers vom Rande nach dem Zentrum der adsorbierenden hin ändert. Während für die Adsorptionsfähigkeit amorpher Körper das Verhalten von Holzkohle gegen verschiedene Gase typisch ist, erscheint unter den kristallisierten Körpern das Adsorptionsvermögen der Zeolithe für Wasser sichergestellt.

Hingegen ist die Entscheidung der von Bodländer angeregten Frage schwierig, bis zu welchem Grade die als isomorph (im weitesten Sinne) bezeichneten Stoffe gegenseitiges Adsorptionsvermögen besitzen.

Während das Adsorptionsgleichgewicht nicht immer sich vollkommen umkehrbar einstellt, mag noch gezeigt werden, wie die Bildung und Auflösung eines Mischkristalls unter steter Aufrechterhaltung des umkehrbaren Gleichgewichts denkbar ist.

Man denke sich die zu einem Mischkristall zu vereinigenden Mengen der reinen Komponenten zunächst getrennt voneinander in umkehrbarer Weise (d. h. unter Einführung semipermeabler Wände) gelöst, darauf mische man, wiederum umkehrbar, die Lösungen und entferne in umkehrbarer Weise so lange das Lösungsmittel, bis Kristallisation der Lösung eintritt. Die Berechnung der insgesamt hierbei an den semipermeablen Wänden zu leistenden Arbeit bietet eine einfache Anwendung der Gleichgewichtslehre auf die feste Mischungsphase.

Hierbei sieht man von der Verschiedenheit der Lösungsfähigkeit über den einzelnen Kristallflächen ab und betrachtet nur die mittlere Löslichkeit. Jedoch kann die Lösungstension über den einzelnen Kristallflächen ebensogut verschieden sein, wie die Dampfspannung, von welcher wir schon oben sprachen.

Daß diese Verschiedenheit der Lösungsfähigkeit für die ungleichwertigen Flächen eines Kristalls wirklich existiert, ist z. B.

Digitized by Google

von Miers experimentell nachgewiesen; die Berücksichtigung dieser Unterschiede läßt das Gleichgewicht zwischen Kristall und Lösung sehr kompliziert erscheinen.

Denn man darf nicht etwa die verschiedenen ungleichwertigen Flächen als verschiedene Phasen betrachten, da sonst nur diejenige, deren Löslichkeit am geringsten ist, stabil wäre, während die anderen natürlichen Umgrenzungsflächen verschwinden müßten.

Während hier noch ungelöste Schwierigkeiten bestehen, mag folgender Erfolg der Gleichgewichtslehre für dieses Gebiet erwähnt werden: Man hat die Tatsache, daß Alaun und Kochsalz aus gewissen Lösungen in Form von Würfeln, aus gewissen anderen Lösungen aber als Oktaeder kristallisieren, theoretisch erklärt:

Man hat gefunden, daß diese Verschiedenheit durch die ungleiche Löslichkeit der Oktaeder- und Würfelflächen hervorgerufen wird. In solchen Lösungsmitteln, in denen das Oktaeder sich ausbildet, erwiesen sich die Flächen desselben als schwerer löslich, während sie in den Lösungsmitteln, die zu Bildung von Würfeln führen, leichter löslich sind als die Würfelflächen.

1h) Einfluß der Korngröße. Die Erfahrung zeigt, daß feinkörnige Kristallisationen innerhalb ihrer gesättigten Lösung im Laufe der Zeit grobkörniger werden. Es erklärt sich dieses Verhalten dadurch, daß die größeren Kristalle auf Kosten der kleineren wachsen. Diese Erscheinung ist analog dem Phänomen, daß zwei sich berührende kleine Tropfen zu einem einzigen größeren Tropfen sich zu vereinigen streben. Das Gemeinsame beider Erscheinungen besteht darin, daß die Oberflächenspannung sich verkleinert, wenn man mehrere kleinere Massen der gleichen Substanz zu einer einzigen Masse vereinigt. Hieraus folgt im einen Fall, daß die Dampfspannung über einem kleinen Tropfen diejenige über einem größeren übertrifft; und im anderen Falle folgt, daß die Lösungstension über einem kleineren Kristalle diejenige über einem größeren übertrifft.

Das Gleichgewicht zwischen kristallisierten Körpern und ihren Schmelzen ist von größter Wichtigkeit für das Studium der Legierungen in der Metallographie.

Die Legierungen der Metalle stehen den Mischkristallen nahe, erweisen sich aber im Gegensatz zu diesen bei mikroskopischen Untersuchungen sehr oft als inhomogen. Die Fälle beschränkter Mischkristallbildung (vgl. die Artikel „Lösungen“ und „Legierungen“) ist unter den Metallen sehr häufig.

Als eine merkwürdige Verschiebung des Gleichgewichtszustandes mag hier noch die ebenfalls an gewissen Legierungen beobachtbare Umlagerung feinkörniger Strukturen zu größeren einheitlichen Individuen erwähnt werden, die Rinne als „Sammelkristallisation“ bezeichnet hat.

Länger bekannt als dieses Phänomen ist die Umlagerung sogenannter mimetischer Kristalle, welche sich aus einer großen Anzahl von Zwillingslamellen aufbauen, zu einem einheitlichen Kristall bei Temperaturerhöhung.

Daraus z. B., daß der bei Zimmertemperatur die reguläre Symmetrie nur nachahmende Borazit bei Erhitzung wirklich regulär wird, folgt, daß das Gleichgewicht zwischen den zahllosen Zwillingslamellen des gewöhnlichen Borazits beim Erhitzen labil wird und daß die parallele Anordnung der Moleküle in der Hitze stabiler ist als die verzwillingte.

Das Gleichgewicht zwischen kristallisierten Körpern und ihren Schmelzen ist für das Studium der Eruptivgesteine von größter Bedeutung; es hat besonders J. H. L. Vogt unter diesem Gesichtspunkt die Silikatsschmelzen untersucht. Gesteinsstrukturen, welche derjenigen des Schriftgranits gleichkommen, sind als eutektische Strukturen aufzufassen; die Zusammensetzung der Feldspate in ihrer Abhängigkeit von dem sie erzeugenden Gestein erklärt sich aus den Roozeboomschen Schmelztypen der Mischkristalle u. dgl.

Die „Differentiation“ der petrographischen Schmelzmagmen bietet andere Anwendungen der Gleichgewichtslehre. Vielfach erscheinen die Differentiationsphänomene analog der Beobachtung, daß die unbeschränkte Mischbarkeit von Wasser und Alkohol durch Zusatz mancher Salze in eine beschränkte Mischbarkeit sich umwandelt, so daß eine Zerlegung der anfangs homogenen Flüssigkeit in zwei flüssige Phasen erfolgt.

Die Erstarrung der Meteoriten endlich bietet mancherlei Anwendungen der Gleichgewichtslehre und steht mit dem Verhalten der Eisen-Nickellegierungen in enger Beziehung.

2. Amorphe Körper. 2a) Amorphe homogene feste Körper als Flüssigkeiten mit großer innerer Reibung. Während man früher anzunehmen geneigt war (siehe den Artikel „Flüssigkeiten“), daß die amorphen Körper bei genauerer mikroskopischer Untersuchung sich als kryptokristallin erweisen würden, haben sich in den letzten Jahrzehnten prinzipielle Unterschiede zwischen beiden Körperklassen ergeben und Tammann hat für sie ganz abweichende Eigenschaften durch Versuche mit Anwendung sehr hohen Druckes aufgefunden (vgl. Tammanns Buch: „Kristallisieren und

Digitized by Google

Schmelzen"). In der Tat stehen die amorphen Körper den flüssigen schon deshalb näher als den kristallisierten Körpern, weil sie sich beim Schmelzen vollkommen stetig in die flüssigen umformen, indem die innere Reibung sich ganz allmählich vermindert und ein scharfer Schmelzpunkt nicht existiert.

Hingegen weisen die kristallisierten chemischen Verbindungen einen scharfen Schmelzpunkt und bei ihm eine plötzliche sehr intensive Verminderung der inneren Reibung auf.

Doch muß hier die Ausnahme bemerkt werden, die man neuerdings fand, daß auch die bei sehr hohen Temperaturen schmelzenden kristallinischen Silikatmineralien einen unscharfen Schmelzpunkt und eine allmähliche Abnahme der inneren Reibung zeigen.

Auch beweisen die langsamen Formänderungen, welche Stangen amorpher Körper bei lange andauernden Belastungen erfahren, daß man die amorphen Körper als Flüssigkeiten mit großer innerer Reinung auffassen kann. Diese Belastungen brauchen nur schwach zu sein oder können in vielen Fällen schon durch das eigene Gewicht der betreffenden Körper (Siegellackstangen u. dgl.) ersetzt werden.

Die Eigenschaft der amorphen Körper, im freien Zustand Kugelform anzunehmen, nähert sie ebenfalls mehr den Flüssigkeiten als den Kristallen; endlich nehmen sehr oft die durch Abkühlung von Schmelzen entstandenen amorphen Körper eine Mittelstellung zwischen diesen und den kristallisierten Körpern dadurch ein, daß sie im Laufe der Zeit sich in kristallinische Produkte umlagern.

Hierfür liefern die aus vielen Gläsern entstehenden Entglasungsprodukte einen Beleg; z. B. die altrömischen Gläser für sehr langsame Entglasung, sogenanntes Réaumursches Porzellan für rasche Entglasung; unter den natürlichen Gläsern der vulkanischen Produkte enthalten viele Obsidiane, Pechsteine u. dgl., nachträglich erfolgte Kristallbildungen. Für die kleinen aber zahlreichen Kristalle, welche man bei der mikroskopischen Untersuchung von Harzen gefunden hat, ist es noch nicht nachgewiesen, ob sie stets nachträgliche Bildungen sind.

2b) Amorphe heterogene feste Körper als disperse Systeme (vgl. den Artikel „Disperse Gebilde"). Nicht immer sind die amorphen Körper einheitlich, oft erweisen sie sich vielmehr aus zwei oder mehr Körpern in feinster Wechsellagerung bestehend, nach Art der okkludierte Gase enthaltenden Holzkohle oder der für Farbstoffe aufnahmefähigen tierischen Kohle. Auch das eigenartige Farbenspiel des Edelsteins Opal erklärt sich durch winzigste, fein verteilte Inhomogenitäten und durch die an den Grenzen derselben stattfindenden Beugungen des Lichts. Durch Einlegen von Opal in Wasser und ähnliche Operationen können unter Umständen diese kleinen Einschlüsse (die beim Opal nach einigen Beobachtern Gas, nach anderen Flüssigkeiten sein sollen) sich ändern, wodurch auch das Farbenspiel an Schönheit gewinnt.

Nach W. Ostwald bezeichnet man derartige aus zwei innig gemengten Stoffen bestehende Substanzen als „disperse Systeme" und man unterscheidet zwischen „Dispersionsmittel" und „disperser Phase". In obigem Beispiel wäre die Kieselsäure das Dispersionsmittel, hingegen wären die Einschlüsse als dispergiert innerhalb des Dispersionsmittels anzusehen.

Diese beiden Bezeichnungen verhalten sich also ähnlich zueinander wie Lösungsmittel und gelöste Stoffe. Näheres siehe in dem Artikel „Disperse Gebilde".

Als Uebergangsglieder zwischen kristalloider und kolloider Ausbildungsform können Stärke und andere äußerst hochmolekulare organische Stoffe betrachtet werden, indem die Stärkekörner durch ihren polygonalen Umriß (der für die mikroskopische Unterscheidung der verschiedenen Stärkesorten wichtig ist) das Verhalten der Kristalle bereits etwas nachahmen, während ihre sonstigen Eigenschaften den amorphen Körpern entsprechen.

Von einem anderen Gesichtspunkt aus erscheinen die fließenden, flüssigen und scheinbar lebenden Kristalle als merkwürdige Uebergangsglieder, teils zwischen den festen und flüssigen, teils zwischen den kristallisierten und amorphen, teils zwischen den bewegungslosen und den die Bewegungsfreiheit nachahmenden leblosen Körpern (vgl. den Artikel „Kristalle, flüssige Kristalle").

Literatur. *W. Ostwald, Lehrbuch der allgemeinen und physikalischen Chemie (noch nicht vollendet).* — *O. Lehmann, Molekularphysik und viele andere Publikationen von O. Lehmann.*

E. Sommerfeldt.

Festigkeit.

Einleitung. 1. Grundbegriffe. 2. Fließen fester Körper, insbesondere der Metalle. 3. Plastizität und kristallinische Struktur. 4. Einfluß der chemischen Zusammensetzung. Metastabile Gleichgewichte. 5. Festigkeit gegen einfache Beanspruchungsarten. a) Zugfestigkeit. b) Druck- und Knickfestigkeit. c) Biegungs-

Digitized by Google

festigkeit. d) Torsionsfestigkeit. 6. Festigkeit gegen zusammengesetzte Beanspruchung. Allgemeine Festigkeitstheorien. 7. Einfluß des Belastungswechsels. 8. Einfluß der Belastungsgeschwindigkeit. Stoßartige Belastung.

Einleitung. Die Festigkeit eines Stoffes ist kein einheitlicher Begriff; wir wollen vielmehr in diesem Begriff sämtliche Eigenschaften zusammenfassen, die sein Verhalten mechanischen Kräften gegenüber bestimmen, insbesondere wenn diese groß genug sind, am Körper beträchtliche Formenänderungen oder Bruch herbeizuführen. Die meisten Untersuchungen über Festigkeit beziehen sich auf die in der Technik benutzten Konstruktionsmaterialien (hauptsächlich auf Metalle und Baustoffe) und sind zu dem Zwecke unternommen worden, Grundlagen für die Beurteilung der Sicherheit von technischen Konstruktionen zu verschaffen. Die hierauf bezüglichen Rechnungsmethoden (Festigkeitsberechnungen) bilden eine besondere Disziplin, die sogenannte technische Festigkeitslehre. Diese fußt auf zweierlei Grundlagen: eine erste Grundlage bietet die mathematische Elastizitätslehre (vgl. den Artikel „Elastizität"), die darüber Aufschluß gibt, welche Spannungen eine bestimmte Belastung in dem Körper hervorruft; als zweite Stütze dient die in engerem Sinne genommene (physikalische) Festigkeitslehre, indem sie angibt, bis zu welchen Grenzen die Spannungen ohne Gefahr gesteigert werden können. Die physikalische Festigkeitslehre hat also vor allem zu erforschen, welche Kräfte zum Bruch oder zu bleibender Deformation führen, ferner in welcher Weise die Festigkeitseigenschaften von besonderen Umständen, wie z. B. von Temperaturerhöhung, von der Vorbehandlung des Stoffes, von der Häufigkeit der Beanspruchung usw. abhängen.

In enger Beziehung mit der physikalischen Festigkeitslehre steht das technische Materialprüfungswesen, dem man einen großen Teil unserer Kenntnisse über die Festigkeitseigenschaften der technisch wichtigen Materialien verdankt. Allerdings treten bei der technischen Materialprüfung oft die rein praktischen Gesichtspunkte in den Vordergrund und bei komplizierteren Vorgängen verzichtet man zuweilen auf eine nähere Analyse der Erscheinung und beschränkt sich auf die Ermittelung von Vergleichswerten mit Hilfe von Versuchen, die an allen Stoffen in genau derselben Weise vorgenommen und dabei möglichst den praktischen Belastungsverhältnissen nachgebildet werden.

1. Grundbegriffe. Wird ein Stab aus Flußeisen einer Zugkraft unterworfen und diese soweit gesteigert, bis der Stab zerreißt, so zerfällt der ganze Vorgang sehr deutlich in zwei Abschnitte. Anfangs ist auch zu einer geringen Verlängerung des Stabes, die nur mit feineren Meßinstrumenten nachzuweisen ist, eine sehr erhebliche Kraftsteigerung notwendig, während von einer gewissen Belastung an viel kleineren Laststufen ganz erhebliche, mit freiem Auge sichtbare Dehnungen entsprechen. Wird der Stab während der ersten Periode entlastet, so geht die Dehnung fast vollkommen zurück, d. h. die Deformation ist fast rein elastisch; im zweiten Abschnitt des Versuches verschwindet dagegen beim Entlasten nur ein verhältnismäßig geringer Anteil, während der überwiegende Teil der Verlängerung als bleibende Formänderung bestehen bleibt. Man bezeichnet die bleibende Formänderung im Gegensatz zur elastischen oft als „plastische Deformation". Ebenso findet man auch bei anderen Beanspruchungen (Druck, Torsion usw.), daß kleine Kräfte vornehmlich elastische Deformationen hervorrufen; überschreitet aber die Kraft eine gewisse Grenze, so entsteht eine überwiegend plastische Deformation. Man geht von der Vorstellung aus, daß für diese Grenze die Größe der Spannung (spezifische Belastung = Belastung für die Flächeneinheit) maßgebend ist und bezeichnet die entsprechende Spannung als „Elastizitätsgrenze" des Stoffes. Der Zugversuch liefert insbesondere die Zugelastizitätsgrenze; spricht man von Druck- und Torsionselastizitätsgrenze, so versteht man darunter jenen kleinsten Wert der Druck- bezw. Schubspannung, die beim Druck bezw. beim Torsionsversuch zu bleibenden Formänderungen führt.

Die Feststellung der Elastizitätsgrenze ist stets mit mehr oder weniger Willkür behaftet, da man neben der elastischen Formänderung bei noch so kleinen Belastungen schon infolge der elastischen Hysteresis stets eine bleibende Deformation nachzuweisen vermag. Die Elastizitätsgrenze ist also sozusagen von der Genauigkeit der Meßapparate abhängig. In der Praxis wird daher die etwas unbestimmte Elastizitätsgrenze durch die zumeist besser ausgeprägte Streckgrenze (beim Druckversuch auch Quetschgrenze genannt) ersetzt (Fig. 1). Unter Streckgrenze versteht man jene Spannung, bei der man zuerst erhebliche Formänderung ohne nennenswerte Kraftsteigerung erhält. An und für sich ist dieser Begriff auch nicht schärfer bestimmt, wie die Elastizitätsgrenze; praktisch bewährt er sich jedoch besser, da die bleibende Formänderung bei vielen Stoffen zunächst ganz allmählich einsetzt, bis der Stab dann bei einer ganz bestimmten Last plötzlich eine ganz erhebliche Verlängerung oder Verkürzung erleidet. Die entsprechende Spannung heißt die Streckgrenze. Bei einigen Stoffen (z. B. bei Flußeisen) erfolgt diese plötzliche Streckung sogar unter abnehmen-

Digitized by Google

der Last und erst eine Weiterstreckung erfordert wieder Kraftsteigerung. In diesen Fällen unterscheidet man eine obere und eine untere Streckgrenze, entsprechend dem nacheinander folgenden Maximum und Minimum der Belastung.

Bezüglich ihres Verhaltens jenseits der Elastizitätsgrenze teilt man die Stoffe in plastische und spröde ein. Bei plastischen

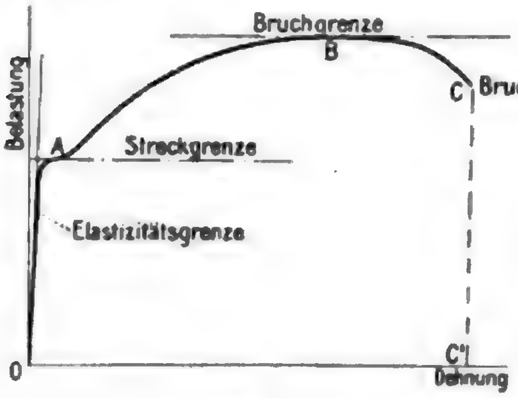


Fig. 1.

Stoffen (wie bei Flußeisen, Kupfer, Blei usw.) erfolgt der Bruch erst nach erheblichen bleibenden Formänderungen, während bei spröden Stoffen die Ueberschreitung der Elastizitätsgrenze fast unmittelbar zum Bruch führt. Einige Autoren unterscheiden noch zwischen plastischen Stoffen im engeren Sinne und zähen Stoffen, je nachdem die bleibende Deformation unter konstanter (evtl. unter etwas abnehmender) Belastung erfolgt, oder weitere Deformation stets weitere Kraftsteigerung erfordert. Bei zähen Stoffen erfolgt der Bruch erst bei einer Belastung, die erheblich höher liegen kann, als die Streckgrenze. Diese Höchstbelastung heißt die „Bruchlast"; auf die Flächeneinheit bezogen, liefert sie die „Bruchgrenze" des Stoffes. Die Bruchgrenze des Zug- bzw. Druckversuchs wird auch schlechthin als „Zugfestigkeit" bezw. „Druckfestigkeit" des Materials bezeichnet. Ebenso wird beim Biegungs- oder beim Torsionsversuch die der Bruchlast entsprechende größte Spannung als „Biegungs-" bezw. „Torsionsfestigkeit" bezeichnet. Allerdings wird diese Spannung zumeist nur rechnerisch ermittelt und zwar unter Voraussetzung der Gültigkeit des Hookeschen Gesetzes bis zum Bruch; in solchen Fällen sind die berechneten Werte mehr als Hilfsgrößen und nicht als wirkliche physikalische Konstanten des Materials anzusprechen. Bei spröden Stoffen ist die Bruchgrenze die allein maßgebende, da die Elastizitätsgrenze meist unbestimmt und auch keine Streckgrenze vorhanden ist.

Das verschiedene Verhalten der Stoffe kommt am einfachsten durch die sogenannte „Formänderungskurve" zum Ausdruck, die eine graphische Darstellung der Beziehung zwischen Spannung und Dehnung liefert. Figur 2 gibt die typische Formänderungs-

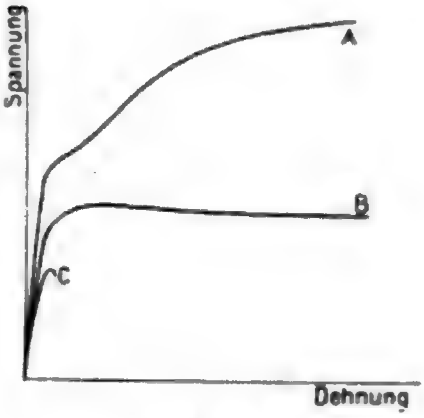


Fig. 2.

kurve eines zähen (A), eines vollkommen plastischen (B) und eines spröden Stoffes (C) wieder.

Es ist sehr wahrscheinlich, daß Plastizität und Sprödigkeit keine Materialeigenschaften sind, sondern vom Spannungszustande abhängen. So werden Gesteine, die bei gewöhnlichen Festigkeitsversuchen sich spröde verhalten, unter hohem allseitigen Druck plastisch, wie dies einerseits aus der bruchlosen Deformation gewisser geologischer Schichten folgt, andererseits durch Druckversuche unter hohem allseitigen Druck nachgewiesen werden kann. So verhält sich z. B. Marmor schon unter einem allseitigen Druck von etwa 6 bis 800 Atm. als vollkommen plastisch; bei noch höheren Drucken liefert der Versuch eine Formänderungskurve, wie man sie sonst nur bei zähen Stoffen erhält. Die Streckgrenze — relativ zu dem im Raume herrschenden allseitigen Druck — beträgt in vollkommen plastischem Zustande etwa 2000 Atm. (ungefähr so viel, wie die Streckgrenze des Flußeisens), während die Druckfestigkeit des spröden Marmors bei atmosphärischem Druck nur 1300 Atm. beträgt.

Als Maß der Plastizität wird oft die Arbeitsmenge betrachtet, die beim Festigkeitsversuch bis zum Bruch geleistet wird. Da die Formänderungskurve auch als Kraft-Weg-Diagramm aufgefaßt werden kann, so liefert die Fläche zwischen Formänderungskurve und Abscissenachse (OABCC' in Fig. 1) unmittelbar die erwähnte Arbeitsmenge, und zwar bezogen auf die Volumeinheit, falls die Belastung auf die Flächeneinheit, die Dehnung auf die Längeneinheit bezogen ist.

2. Das Fließen fester Körper insbesondere der Metalle. Die plastische Deformation wird oft auch als Fließen, die Streck-

Digitized by Google

grenze als Fließgrenze, die Formänderungskurve als Fließkurve bezeichnet. Die genaue Ermittelung der Fließkurve stößt auf Schwierigkeiten, da ein Gleichgewichtszustand sich sehr langsam einstellt. Falls man z. B. Zugversuche an demselben Material mit verschiedenen Geschwindigkeiten ausführt, so erhält man zu denselben Spannungen verschiedene Deformationen und zwar ist die Deformation desto kleiner, je schneller die Belastung gesteigert wurde. Unterbricht man den Versuch und hält den Stab unter konstanter Belastung, so kann man noch sehr lange Zeit eine Deformation nachweisen (Nachfließen). Bei zähen Stoffen nimmt man an, daß die Deformation schließlich doch einer gewissen Ruhelage zustrebt. Diese Ruhelagen bilden die sogenannte „Kurve der unendlich langsamen Dehnungen", d. h. jene Fließkurve, die man bei unendlich langsamer Steigerung der Belastung erhalten würde. Ein vollkommen plastischer Körper wird dagegen unter konstanter Last immer weiter fließen: so stellt sich z. B. beim Eis unter gewisser Belastung eine für lange Zeit gleichförmige Deformationsbewegung ein; diese Beobachtung ist für die Erklärung der Vorgänge in Gletschern von Wichtigkeit.

Ueber das Geschwindigkeitsgesetz des Fließens ist bisher sehr wenig bekannt, ebenso wie wir kein allgemein gültiges Gesetz für den zeitlichen Verlauf der elastischen Nachwirkung kennen (vgl. den Artikel „Elastizität").

Wird ein zäher Körper nach bleibender Deformation entlastet und nochmals belastet, so beginnt das Fließen erst ungefähr bei der vor der Entlastung erreichten Höchstlast. Bei Neubelastung verhält sich der Körper ungefähr so, wie ein elastischer Körper mit höherer Streckgrenze. Diese allgemeine Regel wird oft als Coulomb-Gerstnersches Gesetz bezeichnet. Durch eine Beanspruchung irgendwelcher Art wird die Streckgrenze auch für andere Beanspruchungsarten erhöht; diese Tatsache findet eine praktische Anwendung bei der sogenannten Härtung durch Kaltbearbeitung. Unter Härtung versteht man in diesem Falle schlechthin eine Erhöhung der Streckgrenze: als Kaltbearbeitung bezeichnet man Prozesse, die mit bleibenden Formänderungen verbunden sind (z. B. Hämmern, Walzen, Ziehen usw.), falls sie bei gewöhnlicher Temperatur vorgenommen werden. Wird derselbe Prozeß oberhalb einer bestimmten Temperatur, deren Höhe natürlich von dem Stoffe abhängig ist, vorgenommen, so wird die Streckgrenze nicht erhöht (Warmbearbeitung). Auch die durch Kaltbearbeitung hervorgerufene Erhöhung der Streckgrenze kann im allgemeinen durch Erhitzung über eine bestimmte Temperatur rückgängig gemacht werden (Ausglühen). Wie diese Erscheinungen mit der Struktur der Metalle zusammenhängen, soll weiter unten besprochen werden.

Einige Stoffe zeigen eine systematische Abweichung vom Coulomb-Gerstnerschen Gesetze, indem sie bei Wiederbelastung eine höhere Streckgrenze zeigen als die Höchstbelastung vor der Entlastung. Die Differenz wird noch auffälliger, falls man gewisse Zeit abwartet, d. h. dem Stabe eine sogenannte „Ruhepause" gewährt. Auch wenn statt zu entlasten die Last konstant gehalten wird, beobachtet man ohne jede äußere Einwirkung eine Erhöhung der Streckgrenze. Erst wenn die Streckung länger fortgesetzt wird, läuft die Formänderungskurve später in die normale Fließkurve ein (vgl. Fig. 3, Linie a ohne, Linie b mit Ruhepause). Diese Erscheinungen werden hauptsächlich bei jenen Eisensorten beobachtet, die eine ausgeprägte obere und untere Streckgrenze zeigen, und es ist sehr wahrscheinlich, daß die obere Fließgrenze überhaupt als eine Erhöhung der eigentlichen Streckgrenze infolge vorangegangener Beanspruchungen während der Herstellung zu deuten ist.

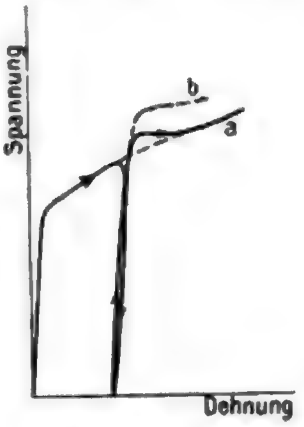


Fig. 3.

Es muß noch auf eine Rückwirkung der bleibenden Deformation auf die elastischen Eigenschaften der Stoffe erwähnt werden. Während nämlich die Streckgrenze durch die vorangegangene Beanspruchung erhöht wird, findet man die eigentliche Elastizitätsgrenze erniedrigt. Man erhält bereits bei viel kleineren Belastungen merkliche bleibende Aenderungen als bei der ersten Beanspruchung. Man bezeichnet diese Erscheinung als „elastische Ermüdung". Diese Bezeichnung erscheint dadurch berechtigt, daß eine Ruhepause die Elastizitätsgrenze wieder in die Höhe bringt. Mit der Zeit tritt also nach der Ermüdung eine „Erholung" ein. Die Erholung wird durch eine Temperaturerhöhung stark beschleunigt und zwar ist auch eine mäßige Erhitzung, die auf die Streckgrenze noch gar keinen Einfluß ausübt, für die Erholung bereits wirksam.

3. Plastizität und kristallinische Struktur. Die plastische Deformationsfähigkeit der Metalle und Legierungen steht in engem Zusammenhange mit ihrer kristalli-

Digitized by Google

nischen Struktur. Alle diese Stoffe sind lediglich Kristallhaufen: sie bestehen aus einzelnen Kristallen von unregelmäßiger Begrenzung, die ihrer kristallinischen Orientierung nach im allgemeinen nach allen Richtungen gleichmäßig verteilt sind, so daß das Konglomerat isotrop ist. Kristalle haben aber erfahrungsgemäß eine große Deformationsfähigkeit. Sie leisten gegenüber bleibenden Deformationen gewisser Art nur geringen Widerstand. Namentlich sind in Kristallen als regelmäßig aufgebauten Raumgittern Deformationen möglich, bei denen der regelmäßige Aufbau bestehen bleibt und nur einzelne Moleküle ihre Stellung mit anderen Molekülen vertauschen. So ist es z. B. eine Streifung, die wahrscheinlich dadurch entsteht, daß die Begrenzungslinien jener Lamellen, die Verschiebung oder Umlagerung erlitten haben aus der polierten Fläche etwas hervortreten. Ob jede plastische Deformation der Kristalle auf Translation und Zwillingsbildung zurückzuführen sei, ist allerdings sehr fraglich. So viel erscheint aber als sichergestellt, daß die plastische Deformation innerhalb der Kristallkörner vor sich geht, ohne den Zusammenhang des Konglomerats zu stören. Die mikroskopische Untersuchung liefert auch darüber Aufschluß, wie durch die Kaltbearbeitung (plastische Deformation bei gewöhnlicher Temperatur) Gestalt und Größe der Kristallkörner geändert werden.

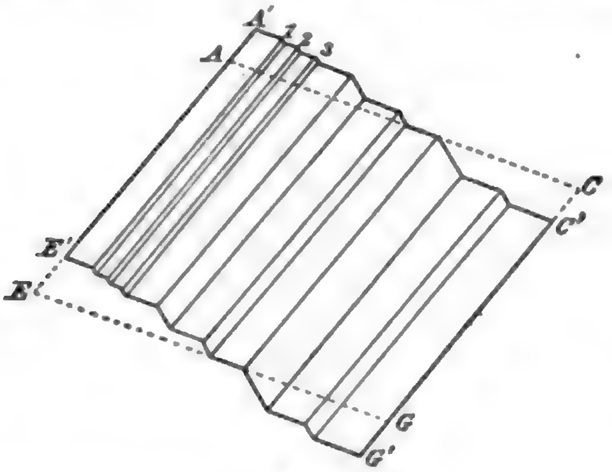


Fig. 4.

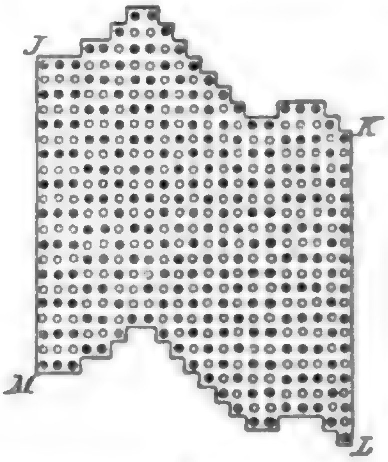


Fig. 5.

bekannt, daß man Kalkspatrhomboeder durch ganz geringe Kräfte deformieren kann, indem man einzelne Lamellen in die sogenannte „Zwillingslage" überführt (vgl. den Artikel „Kristallphysik"). Denkt man sich also die einzelnen Kristallkörner eines Metalls aus Lamellen aufgebaut, so können sie durch Ueberführung der einzelnen Lamellen in die Zwillingslage in sehr mannigfaltiger Weise deformiert werden, besonders wenn man beachtet, daß diese Beweglichkeit nach drei verschiedenen Richtungen besteht. Diese Art der Deformation wird als „Zwillingsbildung" bezeichnet (Fig. 4). Eine andere Art der bleibenden Deformation in Kristallen ist die sogenannte „Translation", bei der einzelne Kristallamellen eine Parallelverschiebung erleiden (Fig. 5). Auch durch diese Art der Deformation kann ein Kristall sozusagen alle möglichen Gestalten annehmen

Bei Metallen und Legierungen sind sowohl Translation als Zwillingsbildung nachgewiesen worden (Heyn, Ewing und Rosenhain) Man kann den Nachweis so führen, daß man die Oberfläche des Probestabs vor der Deformation polieren läßt und die polierte Oberfläche nach der Deformation wieder beobachtet. Man findet dann in vielen Körnern

In natürlichem Zustande kann man die Kristallkörner als „gleichachsig" bezeichnen, da sie, obwohl unregelmäßig begrenzt, nach allen Richtungen ungefähr gleiche Abmessungen haben (Fig. 7a). Dies ist eine Folge des Umstandes, daß das Wachstum der Kristalle bei der Kristallisation nach allen kristallinisch-gleichwertigen Richtungen mit der gleichen Geschwindigkeit geschieht. Nach Versuchen von E. Heyn treten durch die plastische Deformation zweifache Aenderungen im Gefüge ein: zunächst werden die Kristalle in der Kraftrichtung gestreckt, dann bei stärkerer Deformation auch geteilt (Fig. 7b). Man muß annehmen, daß für die Erhöhung der Streckgrenze diese Gefügeänderung maßgebend ist, da beim Ausglühen gleichzeitig mit der Erniedrigung der Streckgrenze die gestreckten Körner sich wieder in gleichachsige umwandeln (vgl. Fig. 7c) Die Rückwandlung geschieht zunächst durch Unterteilung der gestreckten Körner, so daß die durchschnittliche Korngröße des gezogenen und ausgeglühten Materials wesentlich geringer ist als die ursprüngliche Korngröße. Bei weiterer Erhitzung etwa auf 900° beginnen die Kristalle wieder zusammenzuwachsen (Fig. 7d), so daß man die ursprüngliche Korngröße zurückgewinnen kann. Nach den Heyn-

Digitized by Google

Fig. 6. Zwillingslamellen im Dünnschliff eines plastisch deformierten Marmorkörpers. Nach Versuchen des Verfassers.

schen Versuchen scheint aber die Korngestalt größeren Einfluß zu haben als die Korngröße.

Wie durch Gestalt und Größe der Kristallkörner die Streckgrenze beeinflußt wird, können wir bisher nicht genauer verfolgen. Im allgemeinen kann man wohl sagen, daß für die Streckgrenze eines solchen Kristallhaufens zwei Faktoren von Belang sind: erstens der Widerstand des Einzelkristalls gegen bleibende Deformation, zweitens die gegenseitige Beeinflussung der Kristallkörner. Es ist leicht einzusehen, daß der zweite Faktor wesentlichen Einfluß haben muß: der Widerstand des Einzelkristalls hängt offenbar von seiner Orientierung gegen die Kraftrichtung ab; in dem isotropen Haufen sind aber benachbarte Kristalle im allgemeinen verschieden orientiert, woraus folgt, daß sie sich in der Deformation hindern werden. Sie werden in Zwangslagen gebracht, aus denen sie nur durch die bei der

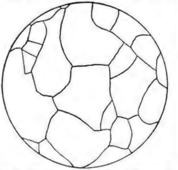


Fig. 7a. Schliff aus einem Eisendraht vor der Beanspruchung. Nach Versuchen von E. Heyn.

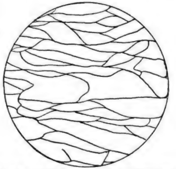


Fig. 7b. Schliff aus einem gezogenen Eisendraht. Nach Versuchen von E. Heyn.

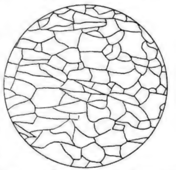


Fig. 7c. Derselbe Draht nach $^1/_2$stündigem Glühen bei 616° C. Nach Versuchen von E. Heyn.

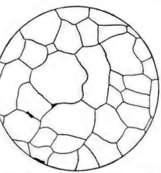


Fig. 7d. Derselbe Draht nach $^1/_2$stündigem Glühen bei etwa 960° C. Nach Versuchen von E. Heyn.

Temperaturerhöhung erlangte größere Bewegungsfreiheit wieder gelöst werden.

4. Einfluß der chemischen Zusammensetzung. Metastabile Gleichgewichte. In der Technik kommen als Konstruktionsmaterialien hauptsächlich nicht reine Metalle, sondern Legierungen zur Verwendung. Es ist sehr charakteristisch, daß die Festigkeitseigenschaften durch kleine Beimengungen sehr wesentlich geändert werden können. Die verschiedenen Flußeisen- und Stahlarten sind Eisen-Kohlenstofflegierungen, bei denen der Kohlenstoffgehalt zumeist unter 1,5% bleibt. Beim sogenannten „Sonderstahl" werden fremde Stoffe ebenfalls in verhältnismäßig geringen Mengen zugemengt, um besonderen Anforderungen an Festigkeit und Plastizität zu genügen. So läßt sich bei reinen Eisen-Kohlenstofflegierungen hohe Streckgrenze und große Dehnbarkeit nicht vereinigen; die sogenannten „harten" Stahlsorten, die hohe Streckgrenze haben, sind mehr oder weniger spröde. Durch Zumischung von 3 bis 3,5% Nickel erhält man aber ein Material, das beide Eigenschaften in hohem Maße besitzt. Nickelstahl bildet heutzutage ein bereits weit verbreitetes Konstruktionsmaterial und wird insbesondere im Schiffbau zur Herstellung von Panzerplatten, neuerdings auch im Brückenbau verwendet. Eisen-Kohlenstoff-Mangan-Legierungen liefern bei geringem Mangangehalt ein sprödes Material; beträgt die Menge des Mangans etwa 4,5 bis 5%, so kann es zu Pulver zerschlagen werden; bei weiterer Steigerung des Mangangehalts wird die Legierung — insbesondere nach rascher Kühlung — wieder plastisch und verbindet mit der Plastizität eine große „Härte", d. h. hohe Widerstandsfähigkeit gegen Eindringen fremder Körper. Der wegen dieser Eigenschaft als Material für Panzerplatten geeignete Manganstahl enthält zumeist etwa 12% Mangan und 1,5% Kohlenstoff; er ist schwer zu bearbeiten, kann nur geschliffen werden und hat außerdem eine verhältnismäßig niedrige Elastizitätsgrenze. Eine hohe Elastizitätsgrenze kann beim Stahl durch Beigabe von Chrom erreicht werden; Chrom wird auch oft zum Nickelstahl beigemengt. 3 bis 3,5% Ni, 0,25% C, 1,5% Cr liefern z. B. ein ganz vorzügliches Material, mit außerordentlich hoher Elatizitätsgrenze (etwa 10000 kg/cm²) und großer Elastizität, das sich hauptsächlich für wechselnde Belastung sehr gut eignet.

Man kann die Festigkeitseigenschaften der Legierungen bei Beibehaltung der chemischen Zusammensetzung auch durch geeignete Wärmebehandlung modifizieren. Nach den Grundsätzen der Thermodynamik entspricht jeder Temperatur und jedem äußeren Druck ein ganz bestimmter thermischer Gleichgewichtszustand, welcher „absolut stabil" ist. Dieser Zustand ist ausgezeichnet durch den kleinsten möglichen Wert des „thermodynamischen Potentials", so wie bei rein mechanischen Systemen das stabilste Gleichgewicht durch den kleinsten Wert der potentiellen Energie bestimmt ist (vgl. den Artikel „Gleichgewicht"). Außer dem stabilsten Gleichgewicht können aber auch sogenannte metastabile Gleichgewichtszustände bestehen. In diesen Zuständen hat das System zwar ein kleineres thermodynamisches Potential, als in allen benachbarten Zuständen, aber doch ein größeres, als im stabilsten Zustande. Der metastabile Zustand ist dementsprechend gegen kleine Störungen stabil, kann jedoch im allgemeinen durch stärkere Störung in den absolut stabilen übergeführt werden. In metastabilem Zustand ist z. B. eine Flüssigkeit, die oberhalb ihres Siedepunktes durch Vermeidung aller Störungen in flüssigem Aggregatzustand erhalten wird. Bei diesem Beispiel genügt eine mäßige Störung, den absolut stabilen Zustand (Verdampfung) herbeizuführen; im festen Aggregatzustande und hauptsächlich bei niedrigen Temperaturen ist jedoch zwischen stabilen und metastabilen Zuständen praktisch kaum ein Unterschied an Beständigkeit. Diese Tatsache findet in der metallurgischen Technik zahlreiche Anwendungen.

Das wichtigste Beispiel eines metastabilen Gleichgewichts liefert das seit uralter Zeit bekannte Härtungsverfahren des Stahls durch „Abschrecken", d. h. Erhitzung und rasche Abkühlung. Bei Eisen-Kohlenstofflegierungen etwa unter 2% Kohlenstoffgehalt kommen zwei chemisch verschiedene Komponenten in Betracht: Eisen und eine Kohlenstoffeisenverbindung von der Zusammensetzung Fe_3C, welche Eisenkarbid oder schlechthin Karbid genannt wird. Das reine Eisen selbst kommt in drei verschiedenen allotropen Modifikationen vor, und zwar bei Temperaturen oberhalb 900° als γ-Eisen, zwischen 900 und 780° als β- und unterhalb 780° als α-Eisen. Die beiden ersten Modifikationen sind hart, γ-Eisen außerdem sehr spröde, α-Eisen weich und plastisch. Das γ-Eisen bildet oberhalb der Umwandlungstemperatur eine feste Lösung mit Karbid, welche Martensit genannt wird. Bei langsamer Abkühlung wandelt sich das γ-Eisen in β- bezw. α-Eisen um; die Umwandlungstemperatur in der Lösung variiert mit dem Kohlenstoffgehalt und zwar ist ein Minimum der Umwandlungstemperatur (eutektischer Punkt) bei etwa 0,85% Kohlenstoffgehalt vorhanden; dieses Minimum liegt bei 690°. Ist die Legierung reicher an Kohlenstoff, so besteht sie

Digitized by Google

nach der Umwandlung aus dem Eutektikum (Mischkristalle aus α-Eisen und Karbid, Perlit genannt) und aus dem überschüssigen Karbid, welches als Zementit bezeichnet wird; ist sie kohlenstoffarm, so scheiden sich außer dem Eutektikum Eisenkristalle (Ferrit) aus. Dies sind die absolut stabilen Zustände; durch rasche Abkühlung kann man jedoch die Umwandlung unterschlagen und die feste Lösung aus Karbid und γ-Eisen in metastabilem Zustand beibehalten. Das Material wird dann hart und spröde. Der metastabile Zustand kann durch Ausglühen und langsames Abkühlen in den stabilen übergeführt werden. Man kann aber auch einen beliebigen zwischenliegenden Härtegrad erreichen durch das sogenannte „Anlassen", indem man mit der Erhitzung unterhalb der Umwandlungstemperatur bleibt. Dies beruht auf dem Umstand, daß in festem Aggregatzustande die Umwandlung mit einer endlichen Geschwindigkeit stattfindet, die bei niedrigen Temperaturen praktisch Null ist und die mit der Temperatur zunimmt. Durch vorsichtige Erhitzung und Abkühlung kann man daher stets eine bestimmte Menge Martensit in Perlit und Zementit bezw. Perlit und Eisen (Ferrit) umwandeln.

Ein anderes Beispiel zum metastabilen Gleichgewicht liefert das durch rasche Abkühlung gewonnene, sogenannte weiße Gußeisen (Hartguß), während das gewöhnliche graue Gußeisen absolut stabil ist. Das weiße Zinn mit metallischem Glanz ist unterhalb 20° ebenfalls metastabil; die stabile Modifikation ist das sogenannte graue Zinn, welches fast ganz pulverartig zerfällt (Zinnfäulnis). Die metastabile Modifikation ist aber so beständig, daß sie nur bei sehr niedrigen Temperaturen ohne besonders starken Anreiz (z. B. Stoß) in die stabile übergeht.

5. **Festigkeit gegen einfache Beanspruchungsarten.** Als „einfache Beanspruchung" gelten Zug, Druck, Biegung und Torsion, insbesondere werden aber in der Praxis die Stoffe auf Zug- und Druckfestigkeit geprüft. Es wird außerdem oft der Scherversuch als einfache Beanspruchung betrachtet; in der Wirklichkeit handelt es sich bei der Abscherung, sei es durch zwei Kanten oder durch Lochung ausgeführt, um einen sehr komplizierten Spannungszustand, den man kaum genau verfolgen kann. Diese Art der Beanspruchung hat also mehr für die Technologie Bedeutung, indem sie geeignet ist, über den nötigen Kraftaufwand beim Abscheren und Lochen Aufschluß zu geben. Große Wichtigkeit besitzt dagegen auch vom theoretischen Standpunkte aus der Härteversuch, d. h. die Prüfung des Widerstandes gegen Eindringen fremder Körper (Eindringungsfestigkeit). Dieser Gegenstand soll jedoch in dem besonderen Artikel „Härte" behandelt werden.

Die Vorrichtungen zur Ausführung von Festigkeitsversuchen werden als Festigkeitsmaschinen oder Materialprüfungsmaschinen bezeichnet. Die Kraftübertragung geschieht entweder durch mechanische Uebersetzung oder durch den Kolben einer hydraulischen Pumpe. Die Kraftmessung beruht zumeist auf dem Prinzip der Wage und zwar kommen die Hebelwage mit Laufgewicht oder die Neigungswage, bei kleineren Maschinen auch die Federwage in Betracht. Manchmal geschieht die Kraftmessung unmittelbar durch Messung des Druckes, der auf den Kolben der hydraulischen Pumpe wirkt. Dieses Meßverfahren ist jedoch mit Ungenauigkeit behaftet wegen der Reibung, die an dem Kolben bezw. an den Liderungsflächen wirkt und nie genau bekannt ist. Man schaltet also zumeist eine möglichst reibungslose hydraulische Uebertragung ein; als solche dient z. B. die Meßdose mit elastischer Membran, bei der zwischen dem Pumpenkolben und Probekörper ein völlig abgeschlossener Flüssigkeitsraum eingeschaltet wird; der Druck, der in diesem Raum herrscht, liefert die Größe der Kraft. Als Abschluß für die Flüssigkeit dient eine elastische Membran, die so dünn ist, daß ihr elastischer Widerstand vernachlässigt werden kann. Bei anderen Maschinen wird der Druck durch hydraulische Uebersetzung auf eine Quecksilbersäule übertragen und durch diese unmittelbar gemessen.

Ueber die Messung der Deformation vgl. den Artikel „Elastizität".

Außer den normalen Festigkeitsmaschinen sind besondere Vorrichtungen konstruiert worden für sogenannte Dauerversuche und Stoßversuche (Schlagproben). Die Dauerversuche haben den Zweck, die Widerstandsfähigkeit des Materials gegen wiederholte Belastung zu prüfen. Zumeist wird ein Belastungswechsel zwischen festen Grenzen vorgenommen und zwar so oft, bis der Probestab bricht. Man kann alle Beanspruchungsarten als Dauerversuche ausführen; man mißt dabei die Belastungsgrenzen und zählt die Anzahl der zum Bruch notwendigen Wiederholungen. Bei Stoßversuchen kommen Zug, Druck, besonders aber Biegung in Betracht; als Belastung dient entweder ein frei fallendes Gewicht oder ein Pendel. Gemessen wird die zum Bruch notwendige Arbeitsleistung. Bei Stoßversuchen mit wiederholter Belastung zählt man die Anzahl der Stöße, bis der Probekörper bricht.

5a) Zugfestigkeit. Als Zugfestigkeit des Materials bezeichnet man im allgemeinen die Spannung, die beim Zugversuch der

Digitized by Google

Höchstlast entspricht. Diese Spannung wird zumeist auf den ursprünglichen Querschnitt bezogen; der so gerechnete Wert ist also kleiner als die tatsächlich herrschende Spannung, da der Querschnitt sich während des Versuchs verringert. Außer der Zugfestigkeit pflegt man als Maß der Dehnbarkeit die sogenannte Bruchdehnung, d. h. die vor dem Bruch erreichte größte Verlängerung einer gewissen Meßstrecke anzugeben. Diese Bruchdehnung ist jedoch eine ziemlich willkürlich gewählte Größe, da bei zähen Stoffen die Deformation bis zum Bruch keineswegs gleichförmig über die Länge des Stabes sich verteilt, sondern nach Ueberschreitung der Höchstlast die schwächste Stelle eine viel größere lokale Dehnung erleidet. Diese Erscheinung wird wegen der mit der starken lokalen Dehnung verbundenen Verringerung des Querschnitts als „Einschnürung" (Kontraktion) bezeichnet. Die Einschnürung kann folgendermaßen erklärt werden. Da das Volumen bei der bleibenden Formänderung nahezu konstant bleibt, so entspricht einer Dehnung ε eine Verminderung des Querschnittes ungefähr im Verhältnis $f : f_0 = 1 : 1 + \varepsilon$ (f_0 der ursprüngliche Querschnitt). Die Zugkraft P ist gleich dem Produkt Spannung $\times$ Querschnitt, d. h. $P = f_0 \frac{\sigma}{1+\varepsilon}$; diese Größe nimmt offenbar nur solange zu, bis die Spannung σ rascher wächst, als der Querschnitt abnimmt; trifft dies nicht mehr zu, so muß die Gesamtbelastung bei wachsender Dehnung und wachsender Spannung abnehmen. Wenn aber ein Querschnitt etwas schwächer ist, als die anderen, so erreicht das Produkt Spannung $\times$ Querschnitt in diesem früher sein Maximum als in den anderen Querschnitten, und von dem Moment an wird die Zugkraft offenbar abnehmen; eine unmittelbare Nachbarschaft des schwächsten Querschnittes erleidet also eine wachsende Dehnung unter abnehmender Belastung, während widerstandsfähigere Teile des Stabes sich gar nicht weiter dehnen, da sie gar nicht über das Maximum des Kraftbedarfs hinübergelangt sind, und so bei Abnahme der Last entlastet werden. Die Höchstlast gilt also im allgemeinen als eine Grenze der gleichförmigen Dehnung. Die endgültige Bruchdehnung besteht aus der gleichförmigen Dehnung der gesamten Meßstrecke und aus der viel beträchtlicheren Dehnung der eingeschnürten Stelle, so daß die wirkliche Dehnbarkeit des Stoffes bedeutend größer ist, als man aus der Bruchdehnung schließen würde. Ebenso kann aber die effektive Zugspannung im Moment des Bruches bedeutend größer sein, als die Zugfestigkeit, die der Höchstlast entspricht, da die wahre Zugfestigkeit durch das Verhältnis der Kraft, die im Moment des Bruches herrscht, zu dem eingeschnürten Querschnitt gegeben wird. Sie ist jedoch in dieser Weise schwer zu ermitteln, da die Kraft im Moment des Bruches nicht mit der nötigen Genauigkeit bestimmt werden kann. Man hat auch vorgeschlagen, die wahre Zugfestigkeit in der Weise festzustellen, daß man die Zugstäbe mit Einkerbung versieht, da bei eingekerbten Stäben die Einschnürung gehindert wird. Da in diesem Falle der Bruch fast ohne Querschnittsverminderung erfolgt, würde die Bruchlast dividiert durch den kleinsten Querschnitt unmittelbar die wahre Zugfestigkeit liefern. In der Tat zeigen eingekerbte Stäbe eine größere Zugfestigkeit als zylindrische; gleichzeitig zeigt sich aber, daß die Werte zu sehr schwanken, da die Festigkeit in hohem Maße von der Art der Einkerbung abhängt.

Außer Zugfestigkeit und Bruchdehnung gibt man in der Praxis zumeist noch die Querschnittsverminderung, d. h. das Verhältnis des eingeschnürten und des ursprünglichen Querschnittes an. Diese Querschnittsverminderung kann auch gewissermaßen als Maß der Dehnbarkeit betrachtet werden.

Bei sehr zähen Stoffen lassen sich die Zugstäbe fast völlig zu Spitzen ausziehen, bei sehr spröden Stoffen erhält man dagegen eine zur Zugkraft senkrechte Bruchfläche und keine merkliche Aenderung des Querschnittes. Man nennt die letztere Art des Bruches, bei der eine glatte harte Bruchfläche senkrecht zur wirkenden größten Zugspannung entsteht, „Trennungsbruch". Zwischen den erwähnten Grenzfällen gibt es verschiedene Uebergangsformen. Bei Flußeisen und Stahl erhält man z. B. im Innern des Stabes eine ebene Trennungsfläche, die jedoch an dem einen Bruchstück durch einen mehr oder weniger ausgebildeten Trichter, an dem anderen durch einen entsprechenden Kegel begrenzt wird (vgl. Fig. 8).

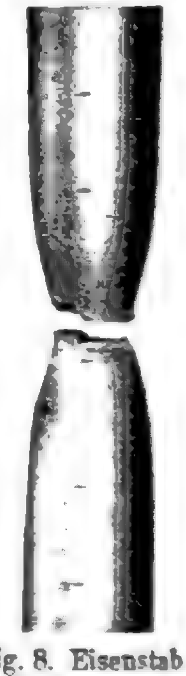


Fig. 8. Eisenstab nach Zugversuch. Nach C. Bach.

Ueber den Einfluß der Temperatur auf die Zugfestigkeit und Bruchdehnung sind besonders bei Metallen und Legierungen viele Versuche ausgeführt worden: praktisch ist dieser Punkt sehr wichtig für alle Konstruktionsteile, die im Betriebe hohen Temperaturen ausgesetzt (Dampfleitungsrohre, Kesselbleche). Bisher ist jedoch für

Digitized by Google

die Temperaturabhängigkeit keine allgemein gültige Gesetzmäßigkeit gefunden worden. Bei sehr hoher Temperatur findet man bei vielen Metallen eine sehr erhebliche Abnahme der Streckgrenze; dies ermöglicht die Bearbeitung im warmen (glühenden) Zustande. Während aber z. B. bei Bronze mit wachsender Temperatur die Zugfestigkeit und die Bruchdehnung gleichzeitig abnehmen, so daß Bronze bei etwa 400° vollkommen spröde wird, nimmt bei Flußeisen die Zugfestigkeit erst zu und erst von etwa 250° an wieder ab; die Zunahme der Zugfestigkeit ist dabei mit Abnahme der Plastizität, die Abnahme der Zugfestigkeit mit Zunahme der Dehnbarkeit verbunden. Gußeisen erleidet bei wachsender Temperatur sehr erhebliche Verminderung an Zugfestigkeit.

Einige Metalle wurden auch bei niedriger Temperatur untersucht. So fand Dewar, daß Eisen bei der Temperatur der siedenden Luft eine um 100%, Silber eine um 26% größere Festigkeit zeigt als bei Zimmertemperatur. Quecksilber hat ungefähr dieselbe Festigkeit wie Blei bei gewöhnlicher Temperatur.

5b) Druck- und Knickfestigkeit. Plastische und zähe Stoffe verhalten sich gegen Zug und Druck im allgemeinen fast in gleicher Weise, indem die Streckgrenze beim Zug- und beim Druckversuch nahezu gleich ist. Während aber beim Zugversuch der Querschnitt abnimmt, nimmt er beim Druckversuch zu und zwar oft in dem Maße, daß man überhaupt zu keinem Bruch gelangt, sondern das Material nur mehr und mehr gestaucht wird. Das Stauchen von kleinen Zylindern aus reinem, sehr weichem Kupfer wird zuweilen zur Kraftmessung benutzt (z. B. zur Kontrolle von Festigkeitsmaschinen, zur Messung des Gasdruckes im Geschützrohre), nachdem man einmal die Beziehung zwischen Last und Zusammendrückung genau bestimmt hat.

Spröde Stoffe zeigen beim Druckversuch zumeist einen sogenannten „Verschiebungsbruch", indem die beiden Bruchstücke an einer zur Kraftrichtung schiefen Fläche abgeschoben werden (Fig. 9). Die Bruchfläche des Verschiebungsbruches unterscheidet sich schon äußerlich von einer Trennungsfläche dadurch, daß sie zumeist mit feinem Mehl bedeckt ist, während die Trennungsfläche hart ist. Sehr charakteristisch ist für den Druckversuch die Bildung von Druckkegeln (Fig. 10) (Druckpyramiden bei Würfeln und Prismen) anschließend an die Druckplatten, die die Kraftübertragung übermitteln. Der Bruch geht in diesen Fällen von den Kanten des Probekörpers aus, die mit der Druckplatte in Berührung stehen. Der Bruch entsteht dadurch, daß das Material an der Kegelfläche abgeschoben wird. Durch das Eindringen des Druckkegels entstehen allerdings Trennungsflächen, die jedoch nur sekundärer Natur sind.

Recht störend ist bei Druckversuchen an spröden Körpern die Reibung an den Druckplatten, wodurch die Verschiebung an den Druckplatten gehindert wird. Dies bewirkt erfahrungsgemäß eine scheinbare Erhöhung der Druckfestigkeit. Versuche, die Reibung durch weiche Zwischenlagen auszuschalten oder durch Schmieren zu vermindern, haben zu keinen befriedigenden Resultaten geführt, da weiche Zwischenlagen oder Schmiermittel sehr leicht in die Poren des Druckkörpers eindringen, und eine Sprengung hervorrufen, wodurch die Druckfestigkeit erniedrigt wird. Durch den Einfluß der Reibung wird die scheinbare Druckfestigkeit eine Funktion vom Längenverhältnis des Probestabes. Die hierauf bezüglichen Versuche zeigen, daß die Druckfestigkeit z. B. bei zylindrischen Probestäben mit wachsendem Verhältnis $\frac{l}{d}$ (l die Länge, d der Durchmesser des Probestabes) nur bis etwa $\frac{l}{d} = 3$ bis 4 erheblich abnimmt. Von dieser Grenze an bleibt die Höchstlast ziemlich konstant. Praktisch wird es also immer genügen, wenn man Stäbe von diesem Längenverhältnis wählt. Eine weitere Vergrößerung der Länge ist mit der damit verbundenen Knickgefahr bedenklich. Die Druckversuche in der Praxis werden zumeist an Würfeln vorgenommen, sie liefern also einen zu großen Wert verglichen mit der wahren Druckfestigkeit.

Fig. 9. Marmorzylinder nach Druckversuch.

Die Orientierung der Druckflächen zur Kraftrichtung ändert sich ebenfalls etwas mit der Länge des Probekörpers; man kann aber doch annehmen, daß der Winkel, den man bei Druckversuchen an nicht allzukurzer

Digitized by Google

Zylindern gewinnt, dem Material charakteristisch ist. Wie dieser Winkel aus den allgemeinen Festigkeitstheorien abgeleitet wird, soll weiter unten dargelegt werden.

Coulomb war der erste, der den Druck beim Druckversuch an spröden Stoffen als

Fig. 10. Sandsteinkörper nach Druckversuch mit Kegelbildung.

Verschiebungsbruch deutete. St. Venant war dagegen der Ansicht, daß für die Druckfestigkeit die Querdehnung maßgebend ist, d. h. der Bruch erfolgt, falls die Dehnung in der Querrichtung ein bestimmtes Maß erreicht. Da er beim Zugversuch auch die Dehnung — und nicht die Spannung — als maßgebend für den Bruch erachtete, so wäre nach seiner Annahme das Verhältnis der Zug- und der Druckfestigkeit gleich der Poissonschen Konstante (Verhältnis zwischen Quer- und Längsdehnung). Diese Beziehung trifft im allgemeinen keineswegs zu; auch widerspricht der Charakter des Druckvorganges dieser Auffassung.

Bei Druckbeanspruchung langer Stäbe kann die Zerstörung, lange bevor die Druckfestigkeit erreicht ist, durch Ausknickung erfolgen. Diese Erscheinung hängt damit zusammen, daß bei gewisser Belastung das Gleichgewicht des gedrückten Stabes labil wird (vgl. den Artikel „Elastizität“). Unter Zugrundelegung des Hookeschen Gesetzes für elastische Deformation kann man die Labilitätsgrenze leicht berechnen und man erhält bei einem Stabe von der Länge l, der an beiden Enden festgehalten, aber drehbar gelagert ist, für die kritische Belastung die sogenannte Eulersche Formel:

$$P = \pi^2 \frac{IE}{l^2}$$

(I kleinstes Trägheitsmoment des Querschnittes, E Elastizitätsmodul). Die der kritischen Belastung entsprechende Spannung $\sigma_k = \frac{P}{F}$ wird als „Knickfestigkeit“ bezeichnet.

Setzt man $I = Fi^2$, wobei i der Trägheitshalbmesser genannt wird, so beträgt

$$\sigma_k = \frac{P}{F} = \pi^2 \frac{E}{\left(\frac{l}{i}\right)^2}.$$

Die Knickfestigkeit hängt also bei demselben Material nur von dem Verhältnis $\frac{l}{i}$ ab, das zuweilen als „Schlankheit“ bezeichnet wird. Diese Gleichung kann naturgemäß nur so lange stichhaltig bleiben, bis die Labilität bei Belastungen eintritt, die innerhalb der Elastizitätsgrenze fallen, da ja bei der Ableitung der Gleichung rein elastisches Verhalten des Materials vorausgesetzt wurde. Diese Voraussetzung wird namentlich bei sehr schlanken Stäben $\left(\frac{l}{i}\text{ groß}\right)$ in der Tat zutreffen. Die allgemeine Regel, daß die Knickfestigkeit nur von dem Schlankheitsverhältnis abhängt, bleibt aber auch für weniger schlanke Stäbe, bei denen die Knickung erst jenseits der Elastizitätsgrenze erfolgt, annähernd richtig. Mit Zugrundelegung des empirisch festgestellten Formänderungsgesetzes kann man die Labilitätsgrenze auch für die Knickung jenseits der Elastizitätsgrenze theoretisch berechnen. In der Praxis werden jedoch zumeist empirische Formeln vorgezogen; so wird z. B. für Flußeisen die Knickfestigkeit (in kg/cm²) als Funktion des Schlankheitsverhältnisses angenähert durch die einfache Beziehung nach Versuchen von Tetmajer

$$\sigma_k = 3100 - 11.4 \frac{l}{i}$$

gegeben. Die Labilitätsgrenze ist eine obere Grenze für die Tragfähigkeit auf Druck beanspruchter Konstruktionen (z. B. bei Druckgurten von eisernen Brücken, bei Säulen usw.), da bei der kritischen Belastung jede kleine Abweichung von der geraden Gestalt oder jede kleine Exzentrizität der Kraftwirkung genügt, sehr beträchtliche Durchbiegungen hervorzurufen. Dabei muß es berücksichtigt werden, daß ursprünglich vorhandene Abweichungen von der geraden Gestalt oder eine Exzentrizität der Kraftwirkung die Tragfähigkeit noch mehr verringern können.

Digitized by Google

5c) Biegungsfestigkeit. Beim Biegungsversuch treten im Material vornehmlich Zug- und Druckspannungen auf, so daß man erwarten kann, daß das Verhalten des Materials gegen Biegung durch das Verhalten beim Zug- und beim Druckversuch bestimmt ist. Innerhalb des Gültigkeitsbereiches des Hookeschen Gesetzes ist die Spannung proportional dem Abstand z von der neutralen Achse (vgl. den Artikel „Elastizität") und beträgt

$$\sigma = \frac{z}{R} E$$

(R Krümmungshalbmesser, E Elastizitätsmodul).

Führt man die Beziehung zwischen Biegungsmoment und Krümmung (J Trägheitsmoment des Querschnitts)

$$M_b = \frac{JE}{R}$$

ein, so wird

$$\sigma = \frac{M_b z}{J}$$

und die größte Spannung

$$\sigma_{max} = \frac{M_b e}{J}$$

wobei e den Abstand der äußersten Faser von der neutralen Achse bezeichnet. Man bezeichnet die Größe $W = \frac{J}{e}$ als Widerstandsmoment des Querschnittes. Die größte Spannung ist alsdann gleich dem Verhältnis $\frac{M_b}{W}$; das Widerstandsmoment W hängt dabei nur von dem Querschnitt ab. Die Biegungselastizitätsgrenze wird im allgemeinen erreicht, falls der Wert $\frac{M_b}{W}$ die Zug- bezw. Druckelastizitätsgrenze überschreitet. Jenseits der Elastizitätsgrenze wird die Spannungsverteilung von der oben angegebenen Spannungsverteilung natürlich abweichen. Verhält sich der Stoff — wie dies bei plastischen und zähen Materialien durchaus der Fall ist — in gleicher Weise gegen Zug und Druck, so wird die Spannungsverteilung in der in Figur 11 angedeuteten Weise geändert. Verhält sich der Stoff verschieden beim Zug- und beim Druckversuch, so wird außerdem die neutrale Achse gegen die Schwerpunktsachse verschoben. Die Abweichung vom Hookeschen Gesetze hat allenfalls zur Folge, daß denselben Dehnungen kleinere Spannungen und somit derselben Krümmung kleinere Biegungsmomente entsprechen.

Stäbe aus zähen Stoffen lassen sich ohne Bruch sehr stark verbiegen. Da beim Biegungsversuch die beim Zugversuche auftretende lokale Einschnürung ausbleibt, so liefert der Biegungsversuch richtigere Vergleichswerte für die Dehnbarkeit des Materials als der Zugversuch („Kaltbiegeversuch"). Von gutem Flußeisen und Stahl

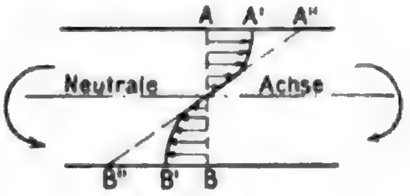


Fig. 11.

wird gefordert, daß ein gerader Stab um eine scharfe Ecke mit möglichst kleinem Krümmungshalbmesser ohne Riß um 180° gebogen werden kann. Bei weniger zähen Stoffen kann man als Vergleichswert für die Dehnbarkeit im allgemeinen den Winkel ansehen, den die beiden Schenkel des gebogenen Stabes — gleiche Abmessungen vorausgesetzt — im Moment der ersten Rißbildung einschließen.

Bei spröden Stoffen ist weniger die Durchbiegung als die Bruchlast von Interesse. Der Bruch erfolgt im allgemeinen in den gezogenen Fasern, da die Zugfestigkeit zumeist bedeutend kleiner ist als die Druckfestigkeit (bei Holz tritt die Zerstörung zuerst in den gedrückten Fasern ein). Würde das Hookesche Gesetz bis zu dem Bruch seine Gültigkeit bewahren, so müßte im Moment des Bruches die mittels der Formel $\sigma_{max} = \frac{M_b}{W}$ ermittelte Spannung mit der Zugfestigkeit des Materials übereinstimmen. Man kann aber leicht einsehen, daß durch die Abweichungen vom Hookeschen Gesetz die zu der neutralen Achse näher liegenden Fasern verhältnismäßig stärker herangezogen werden, als innerhalb der Elastizitätsgrenze, so daß bei gleichem Biegungsmoment die größte Spannung in Wirklichkeit kleiner ausfällt als der Wert, den die Formel liefert. Infolgedessen ist der nach der Biegungsformel gerechnete scheinbare Wert der Biegungsfestigkeit bei den meisten spröden Stoffen erheblich größer als die direkt ermittelte Zugfestigkeit (bei Gußeisen bis zweimal so groß) und außerdem hängt sie von der Querschnittsform ab. Wird die größte Spannung mit Berücksichtigung des mittels eines Zug- und eines Druckversuches empirisch festgestellten Formänderungsgesetzes ermittelt, so stimmt diese wahre Biegungsfestigkeit mit der Zugfestigkeit nahezu überein.

5d) Torsionsfestigkeit. Beim Torsionsversuch tritt das verschiedene Verhalten zäher und spröder Stoffe ebenfalls sehr

stark hervor. Bei zähen Stoffen ist zunächst die Elastizitätsgrenze von Interesse, d. h. das Drehmoment, bei dem bleibende Aenderungen auftreten. Die dieser Belastung entsprechende größte Schubspannung wird als Torsionselastizitätsgrenze bezeichnet. Zugelastizitätsgrenze und Torsionselastizitätsgrenze verhalten sich bei plastischen und zähen Stoffen etwa wie 2:1. Die Anzahl der Verdrehungen, die bei Stäben mit gleichem Querschnitt auf die gleiche Länge fallen, wenn die Verdrehung bis zum Bruche fortgesetzt wird, kann ebenfalls als Vergleichswert für die Dehnbarkeit dienen. Der Bruch erfolgt bei zähen Stoffen senkrecht zur Stabsachse, d. h. in der Ebene, in der die Schubspannungen wirken; man hat also einen typischen Verschiebungsbruch vor sich. Bei spröden Stoffen entsteht dagegen ein Trennungsbruch; da die größte Zugspannung unter 45° zur Achsenrichtung geneigt ist, so ist die dazu senkrechte Trennungsfläche ebenfalls unter 45° zur Achse geneigt (vgl. Fig. 12). Nach erfolgter Rißbildung werden

Fig. 12. Torsionsversuch an einem Gußeisenrohr. Nach C. Bach.

die beiden Bruchstücke in axialer Richtung voneinander abgeschoben, sodaß eine sekundäre Verschiebungsfläche zustande kommt. Als Torsionsfestigkeit bezeichnet man schlechthin die größte Schubspannung, die nach dem Hookeschen Gesetze der Bruchlast entsprechen würde. Für kreisförmige Querschnitte gilt dann die Formel

$$T_{max} = \frac{M_t r}{J_p}$$

(Mt Torsionsmoment, r Halbmesser des Querschnitts, J_p polares Trägheitsmoment). Eine Berechnung der größten Spannung unter Berücksichtigung der Abweichungen vom Hookeschen Gesetze fehlt bisher. C. Bach hat an Gußeisenstäben das Verhältnis der auf Grund der elastischen Theorie gerechneten Schubspannung und der Zugfestigkeit ermittelt und die Abhängigkeit dieses Verhältnisses von der Querschnittsform festgestellt.

6. Festigkeit gegen zusammengesetzte Beanspruchung. Allgemeine Festigkeitstheorien. Eine der Hauptaufgaben der Festigkeitslehre, deren Lösung erst die allgemeinste Grundlage der Festigkeitsberechnungen liefern würde, besteht in der Erforschung der Abhängigkeit der Elastizitätsgrenze und des Bruchs von der Art des Spannungszustandes. Diese Frage tritt auch schon bei den bisher betrachteten einfachen Fällen hervor, sobald wir nach der Beziehung zwischen Zug-, Druck- und Torsionsfestigkeit fragen; notwendigerweise muß sie aber in den Vordergrund treten, sobald wir zusammengesetzte Beanspruchung, d. h. gleichzeitige Anwendung der bisher betrachteten Beanspruchungsarten in Betracht ziehen wollen. Fälle zusammengesetzter Beanspruchung (z. B. Torsion und Biegung) kommen in der Praxis sehr oft vor (z. B. bei verschiedenen Maschinenteilen, Wellen, Achsen usw.). Aus Mangel experimenteller Grundlagen sind im Laufe der Zeit verschiedene Hypothesen aufgestellt worden. In der technischen Praxis ist zumeist die Ansicht verbreitet, daß als Maß der Beanspruchung entweder die im Körper auftretende größte Spannung oder die größte Dehnung anzusprechen ist. Die erste Annahme haben namentlich Lamé und Clapeyron, ferner Rankine ihren Festigkeitsberechnungen zugrunde gelegt, während die Annahme der größten Dehnung von Poncelet und St. Venant herrührt. Nach den Versuchen über zusammengesetzte Beanspruchung trifft jedoch keine dieser Annahmen allgemein zu. Die Frage ist allerdings bisher nur für zähe Stoffe einwandsfrei erledigt, während bei spröden Stoffen einstweilen Zweifel darüber bestehen können, wodurch der Bruch bedingt ist.

Bei plastischen und zähen Stoffen ist hauptsächlich die Abhängigkeit der Streckgrenze vom Spannungszustand von Interesse, da die Tragfähigkeit, wenn auch der Bruch erst bei größeren Belastungen eintritt, durch die mit beträchtlichen Formänderungen verbundene Streckgrenze bedingt wird. In neuester Zeit sind zahlreiche Versuche an Stäben aus Kupfer, Flußeisen und weichem Stahl angestellt worden. Die Stäbe wurden in der verschiedensten Weise

Digitized by Google

kombinierten Belastungsarten unterworfen; so wurde z. B. Zug-, Druck- und Biegung mit Torsion kombiniert, es wurden ferner Rohre gleichzeitig einem inneren Drucke und Zug bezw. Torsion unterworfen. Diese Versuche von denen hauptsächlich die sehr ausgedehnten Versuchsreihen von Guest zu erwähnen sind, führten zu dem Ergebnis, daß der Streckgrenze weder ein konstanter Wert der größten Spannung noch ein solcher der größten Dehnung entspricht; es ist vielmehr die größte Schubspannung, die in allen Fällen nahezu konstant ist. Ein Spannungszustand ist im allgemeinen durch die Werte der drei Hauptspannungen σ_1, σ_2, σ_3 bestimmt. Sind diese drei Hauptspannungen nach der Größe geordnet, so ist die größte Schubspannung gleich $\frac{\sigma_1-\sigma_3}{2}$, d. h. gleich der halben Differenz der extremen Hauptspannungen; sie wirkt in einer Ebene, die durch die Richtungslinie der mittleren Hauptspannung durchgeht und mit den beiden anderen Hauptspannungen einen Winkel von 45° einschließt. Beim einfachen Zug- und Druckversuch ist die größte Schubspannung gleich der Hälfte der größten Zug- bezw. Druckspannung, woraus folgt, daß die Zug- und die Druckelastizitätsgrenze gleich sind und sich beide zu der Torsionselastizitätsgrenze wie 2:1 verhalten. Nach der Annahme der größten Hauptspannung würden sich Zug- und Torsionselastizitätsgrenze wie 1:1 nach der Annahme der größten Dehnung wie $1:1-\nu$ (ν die Poissonsche Zahl) verhalten. (Für Eisen etwa 1:0.7.) Die Versuche bestätigten das Verhältnis 2:1.

Die Annahme der größten Schubspannung oder die damit gleichbedeutende Annahme einer konstanten Differenz der extremen Hauptspannungen („maximum stress-difference theory"), steht auch mit älteren Versuchen von Tresca über Ausfluß plastischer Stoffe durch Oeffnungen in Einklang. Tresca kam zu dem Resultat, daß das plastische Fließen einsetzt, sobald die Schubspannung einen bestimmten festen Wert erreicht hat.

Bei spröden Körpern muß zunächst der Fall des Verschiebungsbruches und des Trennungsbruches auseinandergehalten werden. Für den Verschiebungsbruch hat man früher nach Coulomb angenommen, daß ebenfalls die größte Schubspannung maßgebend ist. Man nahm an, daß die Verschiebung durch die Schubspannung gefördert und durch eine Art innere Reibung gehindert wird; der Bruch sollte erfolgen, falls die Schubspannung die Reibung überwindet. Nach dieser Vorstellung müßte die Bruchfläche bei Verschiebungsbruch stets unter 45° zur Druckrichtung stehen. Dies trifft bei den spröden Körpern fast nie zu. Navier hat diese Auffassung durch die Annahme modifiziert, daß die innere Reibung selbst durch den Druck auf die Verschiebungsfläche, d. h. durch die Normalspannung, die auf die Verschiebungsfläche wirkt, vergrößert wird. Nimmt man an, daß die Reibung aus einem konstanten Teile τ_0 und aus einem der jeweiligen Normalspannung σ proportionalen Betrage $f\sigma$ besteht (f ist der „Reibungskoeffizient"), so wird eine Verschiebung erfolgen, sobald

$$\tau > \tau_0 + f\sigma.$$

Wir wollen diese Betrachtung auf den Fall des einfachen Druckversuches anwenden. Es sei ein Stab vom Querschnitt F durch eine Kraft Q auf Druck beansprucht (vgl. Fig. 13) und wir wollen untersuchen, unter welcher Bedingung eine Verschiebung in irgendeiner Schnittebene AB erfolgen kann; der Neigungswinkel zwischen der Ebene AB und dem senkrechten Querschnitt soll φ betragen. In der Schnittebene entsteht eine Normalspannung und eine Schubspannung. Die resultierende der beiden muß die Kraft Q im Gleichgewicht halten. Da die Schnittfläche $\frac{F}{\cos\varphi}$ beträgt, so liefert die Schubspannung τ eine Kraft von der Größe $\frac{F}{\cos\varphi}\tau$, die Normalspannung σ eine von der Größe $\frac{F}{\cos\varphi}\sigma$.

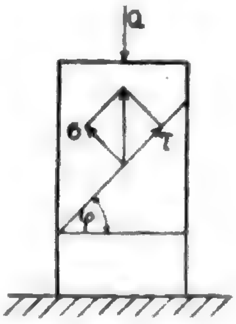


Fig. 13.

Aus der Komponentenzerlegung folgt

$$Q\cos\varphi = \frac{F}{\cos\varphi}\sigma$$

und

$$Q\sin\varphi = \frac{F}{\cos\varphi}\tau$$

oder

$$\sigma = \frac{Q}{F}\cos^2\varphi$$

$$\tau = \frac{Q}{F}\sin\varphi\cos\varphi$$

Das Gleichgewicht hört nach unserer Annahme auf, wenn

$$\tau > \tau_0 + f\sigma$$

wird oder

$$\frac{Q}{F}\sin\varphi\cos\varphi > \tau_0 + \frac{Qf}{F}\cos^2\varphi$$

$$\frac{Q}{F} > \frac{\tau_0}{(\sin\varphi - f\cos\varphi)\cos\varphi}.$$

Der Reibungswiderstand wird offenbar in jener Ebene zuerst überschritten, für welche der Nenner den größten Wert hat; dies trifft für

$$\varphi = 45 + \frac{\alpha}{2}$$

zu, wobei α den sogenannten Reibungswinkel bedeutet, d. h. $\mathrm{tg}\,\alpha = f$ gesetzt wurde. Die Druckfestigkeit beträgt daher, wie eine kleine Umrechnung zeigt,

$$\frac{Q}{F} = 2\tau_0 \sqrt{\frac{1+\sin\alpha}{1-\sin\alpha}}$$

Für $\alpha = 0$ ergibt sich der Spezialfall der größten Schubspannung.

Die Naviersche Annahme hat Ch. Duguet zur Grundlage einer allgemeinen Festigkeitstheorie ausgestaltet. O. Mohr hat die Theorie in der Richtung erweitert, daß er auf die Proportionalität der inneren Reibung mit der Normalspannung verzichtete und nur soviel voraussetzte, daß die Möglichkeit der Verschiebung in irgendeiner Ebene durch die in der betreffenden Ebene wirkende Schub- und Normalspannung bedingt sei: die Verschiebung soll erfolgen, falls die Tangentialspannung eine von der Normalspannung abhängige Grenze überschreitet. Trotzdem diese Annahme als ziemlich allgemein und sehr plausibel erscheint, bedeutet sie eine große Einschränkung der allgemeinen Möglichkeiten. Sobald nämlich auf die Verschiebung in einer Ebene nur die Normal- und die Schubspannung in bezug auf die betreffende Ebene von Einfluß sind, so muß die erste Verschiebung stets in einer Ebene senkrecht zu der Ebene der beiden extremen Hauptspannungen erfolgen und infolgedessen ist die mittlere Hauptspannung für den Bruch ohne Belang. Diese Hypothese ist bisher experimentell nur für zähe Stoffe bestätigt worden.

Die Mohrsche Theorie kann man auch in der Weise auffassen, daß der Reibungskoeffizient f der inneren Reibung vom Spannungszustand abhängig ist. Druckversuche unter allseitigem Druck zeigen, daß bei sonst spröden Stoffen unter hohem hydrostatischen Druck f sich zu dem Werte Null nähert, so daß die Verschiebung in einer Ebene nahezu unter 45° erfolgt und für die Elastizitätsgrenze nur die Differenz der beiden extremen Hauptspannungen maßgebend wird. Dies steht im Einklang mit der bereits erwähnten Tatsache, daß die Körper unter hohem allseitigen Druck plastisch werden.

Eine Bestätigung der Mohrschen Auffassung kann man in den sogenannten „Fließfiguren" und in den Bruchlinien erblicken, die bei zähen bezw. spröden Körpern nach Ueberschreitung der Elastizitätsgrenze auftreten. Die Orientierung dieser Linien entspricht aller Wahrscheinlichkeit nach der Orientierung der Gleitflächen in denen die innere Reibung zuerst überwunden wird.

Als Fließfiguren werden speziell zwei parallele Linienscharen bezeichnet, die bei einigen Materialien nach Ueberschreitung der Fließgrenze erscheinen. Es fragt sich natürlich, weshalb einzelne ausgezeichnete Gleitflächen sichtbar werden. Diese Frage ist noch nicht endgültig geklärt. Nach Ansicht einiger Autoren hängt es mit Fortpflanzung von Schwingungen zusammen; es erscheint aber wahrscheinlicher, daß es um eine Labilitätserscheinung sich handelt, wie bei der örtlichen Kontraktion. Man erhält nämlich gerade bei jenen Stoffen sehr ausgeprägte Fließfiguren, die eine ausgeprägte obere und untere Fließgrenze zeigen. Wir haben gezeigt, daß die gleichförmige Deformation aufhört, falls die Belastung abnimmt. Geht also die Streckung unter abnehmender Belastung vor sich, wie es zwischen der oberen und unteren Streckgrenze der Fall ist, so treten notwendigerweise jene Gleitflächen hervor, längs denen infolge kleiner Inhomogenitäten des Materials der Widerstand etwas geringer ist; erst bei weiterer Zunahme der Last ist die Möglichkeit gegeben, daß die Verschiebung wieder auf alle Gleitflächen gleichmäßig verteilt wird.

Die Bedingungen des Trennungsbruches für spröde Körper sind bisher nicht vollständig geklärt worden. Man kann mit gewisser Wahrscheinlichkeit annehmen, daß für den Trennungsbruch der absolute Betrag der größten Zugspannung maßgebend ist. Es gibt jedoch Versuche, die dieser Annahme entschieden widersprechen. Zerreißversuche an sehr spröden Körpern, ausgeführt in einem Raume, in welchem selbst erhöhter Druck herrschte, führten zu keinem konstanten Wert der Zugspannung, sondern zu einer konstanten Differenz der Zugspannung und des allseitigen Druckes (Voigt). Statt der absoluten Zugspannung erwies sich die Zugspannung relativ zu dem allseitigen Drucke als konstant. Dieser Punkt bedarf indessen einer weiteren Aufklärung.

7. Einfluß des Belastungswechsels. Von hohem praktischen Interesse ist der Einfluß des Belastungswechsels und der Belastungsgeschwindigkeit auf die Festigkeitseigenschaften der Materialien, da in der Praxis viele Konstruktionsteile rasch wechselnder und stoßartiger Beanspruchung unterworfen sind.

Die ersten Versuche über den Einfluß wiederholter Beanspruchung hat A. Wöhler durchgeführt. Bei solchen „Dauerversuchen" werden die Stäbe einer sehr großen Anzahl von wiederholten Beanspru-

Digitized by Google

chungen zwischen gewissen konstanten Belastungsgrenzen unterworfen und der Belastungswechsel so lange fortgesetzt, bis Bruch eintritt. Es zeigt sich, daß eine sehr große Anzahl von Wiederholungen auch dann Bruch hervorrufen kann, wenn die größte Belastung bedeutend unterhalb der Bruchgrenze des Materials liegt. Die Bruchgrenze kann durch eine genügende Anzahl von Wiederholungen sehr erheblich heruntergedrückt werden. Wird z. B. ein Stab bis zu einer gewissen Belastung gezogen und wieder völlig entlastet, so ergeben sich zu verschiedenen Werten der oberen Grenze der Belastung bestimmte Werte für die Anzahl von Wiederholungen, die zum Bruche führen. Je niedriger die obere Belastungsgrenze, desto größer ist die Anzahl der erforderlichen Wiederholungen. So fand z. B. Wöhler bei einem Eisenstab folgende Werte für die gefährliche Anzahl.

Obere Belastungsgrenze kg/cm²	Anzahl der Wiederholungen
3270	800
3000	106 900
2730	340 800
2460	480 800
2190	10 141 700

Es ist aber sehr wahrscheinlich, daß unterhalb einer gewissen Belastung auch bei beliebig oft wiederholten Belastungen kein Bruch eintritt. So übersteigt z. B. bei einer Uhrfeder die jährliche Anzahl der wiederholten Belastungen 150000000, und erfahrungsgemäß büßt eine solche Feder an Tragfähigkeit nichts ein.

Die Anzahl der gefährlichen Wiederholungen hängt außer der oberen Grenze der Belastung auch von der unteren Grenze ab und zwar ist die Anzahl desto größer, je enger die Belastungsgrenzen gewählt werden. Ein Belastungswechsel zwischen der gleichen positiven und negativen Belastung ist z. B. viel gefährlicher, als wiederholte Belastung in einem Sinne.

Was die Erklärung der Erscheinung anbelangt, so war man früher der Ansicht, daß durch die wiederholte Beanspruchung im Gefüge des Materials wesentliche Aenderungen stattfinden müssen; diese Ansicht wurde hauptsächlich durch die Erfahrung gestützt, daß der Dauerversuch auch bei zähen Metallen oft eine glasige, muschelartige Bruchfläche liefert, als wenn das Material seine Zähigkeit ganz verloren hätte. Die mikroskopische Untersuchung zeigt indessen, daß außer lokalen Störungen eigentlich keine Gefügeänderungen vorliegen. Die Bruchgefahr wird dadurch hervorgerufen, daß die mikroskopischen Gleitflächen innerhalb der Kristalle durch die unzählige Wiederholung der Deformation schließlich in winzige Risse übergehen. Wenn dann eine kleine Diskontinuität vorhanden ist, so wird die geschwächte Stelle immer mehr abgearbeitet, bis schließlich ein sichtbarer Riß entsteht. Dies steht mit der Tatsache in Einklang, daß Beanspruchungen unterhalb gewisser Grenzen auch bei beliebig zahlreicher Wiederholung unschädlich sind. Diese Grenze fällt wahrscheinlich mit der Belastung zusammen, bei der die mikroskopischen Gleitflächen zuerst erscheinen.

Aus diesem Sachverhalt folgt, daß der Bruch durch wiederholte Beanspruchung eigentlich nicht als Ermüdung betrachtet werden kann: der ganze Vorgang hat vielmehr einen lokalen Charakter. Es ist aber klar, daß der Bruch begünstigt wird, falls Stellen vorhanden sind, in deren Umgebung besonders große Spannungen entstehen, wie dies bei vielen Konstruktionsteilen der Fall ist (bei gelochten Stäben, bei scharf abgerundeten Wellen usw.). In der Tat sind solche Konstruktionsteile viel empfindlicher gegen wiederholte Belastung. Ebenso ist sogenanntes „überhitztes Eisen" (Eisen, welches bei der Bearbeitung bis 1100° und höher erhitzt wurde), da seine Elastizitätsgrenze besonders niedrig liegt, der Dauerbeanspruchung nicht gewachsen.

8. Einfluß der Belastungsgeschwindigkeit. Stoßartige Belastung. Ein plastischer oder zäher Körper kann bei stoßartiger Belastung vollkommen spröd erscheinen. Sehr auffallend ist z. B. diese Erscheinung bei Pech. Dieses Material läßt sich bei langsamer Belastung plastisch ausziehen, während es bei rascher Belastung wie ein spröder Körper ohne wesentliche Formänderung bricht. Bei Metallen wird die plastische Deformation durch stoßartige Belastung ebenfalls wesentlich vermindert; dagegen die Kraft, die den Bruch hervorruft, vergrößert. Als Maß für die „dynamische Tragfähigkeit" betrachtet man statt der Kraft, die sehr schwer zu ermitteln ist, die Arbeit, die für die Zerstörung des Stabes aufgewendet werden muß. Der Probestab wird zumeist durch ein fallendes Gewicht oder durch ein Pendelwerk stoßweise auf Biegung beansprucht. Wählt man die Fallhöhe so groß, daß der Stab bricht, so liefert die Differenz zwischen der lebendigen Kraft, die der Fallhöhe entspricht, und der lebendigen Kraft, die dem belastenden Gewicht nach dem Schlage noch innewohnt, die zum Bruch aufgewendete Arbeit. Die Arbeitsmenge wird auf die Volumeinheit des Stabes bezogen. Die Probestäbe werden bei solchen Schlagversuchen zumeist mit Einkerbungen versehen, damit der Bruch in einem vorher bestimmten Querschnitt erfolgen soll.

Digitized by Google

Vergleicht man die Arbeit, die beim Schlagversuch verbraucht wird, mit der Arbeitsmenge, die bei dem langsam durchgeführten Festigkeitsversuch geleistet werden muß und die durch das Formänderungsgesetz gegeben ist, so hat man einen Vergleich dafür, wie weit das betreffende Material dynamischen Beanspruchungen gewachsen ist. Die Prüfung der dynamischen Tragfähigkeit ist besonders für Konstruktionsstoffe von Bedeutung, die bei rasch laufenden Maschinen, bei Fahrzeugen usw. Verwendung finden sollen. Sehr wichtig ist der Umstand, daß gewisse Fehler in der Vorbehandlung von Metallen, die das Material für stoßartige Belastung ganz unbrauchbar machen (z. B. Ueberhitzen bei Kupfer und Eisen), durch gewöhnliche Festigkeitsversuche schwerlich entdeckt werden können, da die betreffenden Probestäbe normale Streckgrenze, und bei langsamer Beanspruchung auch normale Bruchgrenze zeigen.

Es sei noch erwähnt, daß eine wiederholte Belastung durch gleiche Stöße zum Bruch führen kann, auch wenn der Körper dem einzelnen Stoß Widerstand leisten kann. Es wurde insbesondere vorgeschlagen, die Brauchbarkeit von Steinen, die im Wegebau Verwendung finden sollen, durch die Anzahl der zum Bruch erforderlichen Stöße zu prüfen (Föppl).

Literatur *(vgl. auch den Artikel „Elastizität").* *1. Lehrbücher der Festigkeitslehre:* **L. Navier,** *Résumé des leçons sur l'application de la mécanique, herausgegeben von St. Venant, 2 Bde., Paris 1864.* — **F. Grashof,** *Theorie der Elastizität und Festigkeit, 2. Aufl., Berlin 1878.* — **Ch. Duguet,** *Déformation des corps solides, 2 Bde., Paris 1882/85.* — **C. Bach,** *Elastizität und Festigkeit, Berlin 1889/90, 6. Aufl. 1911.* — **L. v. Tetmajer,** *Die angewandte Elastizitäts- und Festigkeitslehre, Zürich 1889, 3. Aufl., Wien 1895.* — **J. Résal,** *Résistance des matériaux, Paris 1898.* — **J. A. Ewing,** *The strength of materials, Cambridge 1899, 2. Aufl. 1903.* — **A. Brauer,** *Festigkeitslehre, Leipzig 1905.* — *2. Lehrbücher der Materialkunde und der Materialprüfung:* **W. C. Unwin,** *The testing of materials of construction, London 1888.* — **A. Martens,** *Handbuch der Materialienkunde für den Maschinenbau, I. Teil, Berlin 1898; II. Teil A, von E. Heyn, Berlin 1912.* — **J. B. Johnson,** *The materials of construction, 4. Aufl., New York 1905.* — *3. Monographien:* **C. Bach,** *Abhandlungen und Berichte, Stuttgart 1897.* — **O. Mohr,** *Abhandlungen aus dem Gebiete der technischen Mechanik, Berlin 1906.* — **A. Considère-Hauff,** *Die Anwendung von Eisen und Stahl bei Konstruktionen, Wien 1888.* — **L. v. Tetmajer,** *Die Gesetze der Knickungsfestigkeit, 3. Aufl., Wien 1903.* — *4. Kongreßschriften:* **Commission des méthodes d'essai** *des matériaux de construction. Offizieller Bericht, Bd. I bis IV, Paris 1894.* — **Congrès international des méthodes d'essai** *des matériaux de construction, Paris 1900.* — **Internationaler Verband** *für die Materialprüfungen der Technik, I. bis VI. Kongreß.* — *5. Mitteilungen aus Versuchsanstalten:* **Mitteilungen aus den Kgl. techn. Versuchsanstalten Berlin,** *von 1904 ab Kgl. Materialprüfungsamt in Groß-Lichterfelde.* — **Mitteilungen des mech.-techn. Laboratoriums München.**

Th. v. Kármán.

Festland.

1. Flächenverteilung von Land und Wasser. 2. Einteilung des Festlandes. 3. Gliederung des Festlandes. 4. Vertikaler Aufbau. 5. Reliefformen des Festlandes.

1. Flächenverteilung von Land und Wasser. Unter Festland wird der über den Meeresspiegel emporragende Teil der Gesteinshülle der Erde verstanden. Die bekannten Landmassen können heute zu 135 Mill. km² geschätzt werden; unbekannt sind in der Arktis etwa 4, in der Antarktis etwa 19 Mill. km². Es kann aber angenommen werden, daß das arktische Gebiet vollständig dem Meer, von dem antarktischen dagegen 14 Mill. km² dem Land zuzusprechen sind. Es beträgt dann die Landoberfläche rund 149 Mill. km², die Wasseroberfläche 361 Mill. km². Das Verhältnis beider stellt sich also wie 5:12, genauer wie 29,2:70,8 % oder wie 1:2,42.

Die Verteilung von Land und Wasser ist ungleichmäßig. Auf der nördlichen Halbkugel liegen 39 % Land, auf der südlichen 19 %; auf der östlichen 35 % und auf der westlichen 20 %. Es befindet sich also die größte Ansammlung von Land im nordöstlichen Quadranten. Immerhin erreicht es auch auf einer Halbkugel, deren Aequator die größte mögliche Fläche von Land umfaßt, und deren Pol in 47°15′ N. Br. und 2°30′ W. L., unweit der Loire-Mündung bei Croisic liegt, nur 48 %. Im Gegensatz zu dieser Landhalbkugel nimmt auf der Wasserhalbkugel mit einem Pol in 47°15′ S. Br. und 177°30′ O. L., südöstlich von Neuseeland, das Meer 90,5 % ein. Nach Breitenzonen stellt sich das Verhältnis so, daß zwischen 70° und 40° N. Br. das Land mit 72 bis 52 % überwiegt. Nach einer langsamen Abnahme ist es von 10° N. Br. bis 30° S. Br. mit etwa 23 % nahezu konstant, um dann rasch zu dem Landminimum von 1 % in 50° bis 60° S. Br. abzufallen. Das Landmaximum liegt zwischen 80° bis 90° S. Br. mit voraussichtlich 100 %.

2. Die Einteilung des Festlandes. Das Festland erhebt sich in vier Weltinseln

Digitized by Google

über dem Meeresspiegel, in der Antarktis, Australien, Amerika und Asien mit Europa und Afrika. Inselreihen verbinden Australien mit Asien, die Antarktis mit Amerika. Eurasien, d. h. Asien und Europa, und Amerika umgeben in einem nur durch verhältnismäßig schmale Meeresstraßen unterbrochenen Ring das arktische Mittelmeer. Nach Süden nimmt die Breite der Landmassen mehr und mehr ab, so daß sie endlich in Südamerika, Südafrika und Australien mit Tasmanien keilförmig gegen den Meeresgürtel, der die Antarktis umgibt, auslaufen. Am ausgeprägtesten macht sich dieses Auseinandertreten der Küsten in der Ostküste von Asien und Australien und in der Westküste von Amerika bemerkbar, die so beinahe einen größten Kreis bilden und zwischen sich den pazifischen Ozean einschließen. Die Landhalbkugel wird weiter durch den talförmigen atlantischen Ozean von der Beringstraße bis zum südlichen Wasserring in eine Ost- und Westhälfte, die alte und neue Welt, getrennt. Rechnet man die Antarktis zu dieser, so umfaßt sie 37 %, jene 63 % des festen Landes. Innerhalb der Osthälfte scheidet im Süden der indische Ozean Afrika von Australien. Aequatorial dagegen verläuft ein durch die Einbruchsbecken des amerikanischen, romanischen und australasiatischen Mittelmeeres bezeichneter, Guyots Bruchzone genannter Gürtel, der die Nord- und Südkontinente voneinander trennt. So zerfällt die neue Welt in die beiden durch die schmale, zum Teil jugendliche Brücke von Zentralamerika verbundenen Kontinente von Nord- und Südamerika; die alte Welt in Eurasien, Australien und das durch den Isthmus von Sues angegliederte Afrika. Nur auf einer historischen und kulturellen Trennung beruht der kontinentale Charakter von Europa, das physikalisch eine Halbinsel von Asien ist. Der Meeresring endlich trennt im Süden die Antarktis ab. Mit Ausnahme der südlichen Hälfte von Südamerika sind Festland und Meer antipodisch angeordnet. Die Areale der sieben Kontinente sind:

	Mill. km²		Mill. km²
Asien	44,2	Nordamerika	24,1
Europa	10,0	Südamerika	17,8
Afrika	29,8	Antarktis	14,0
Australien	8,9		

Die alte Welt umfaßt also 93, die neue Welt 56, die Nordkontinente 78, die Südkontinente 57, mit der Antarktis 71 Mill. km².

Diese Verteilung von Land und Wasser hat im Lauf der Erdgeschichte große Aenderungen erfahren. So sind Festlandsverbindungen über den Nord- und Südatlantischen Ozean, zwischen Vorderindien und Südafrika und von Südamerika nach Asien verschwunden, im Gegensatz dazu sind aber auch Meere, die früher in größerer Ausdehnung bestanden haben, wie die sogenannte „Thetys", ein zentrales Mittelmeer vom pazifischen Ozean über Zentralamerika und Südeuropa nach dem indischen Ozean, verkleinert worden. Es ist dabei allerdings bei der auffallenden Spärlichkeit eupelagischer Sedimente in den Gesteinen heutiger Kontinente zweifelhaft, ob von diesen Veränderungen auch die eigentlichen Tiefseeräume betroffen worden sind. Es scheint, daß diese ziemlich permanent geblieben sind, und daß es sich bei den Ueberflutungen der Kontinente nur um Flachmeerbildungen von vorübergehender Dauer gehandelt hat.

3. Die kontinentale Gliederung. Bei jedem Kontinente unterscheidet man den Rumpf und die Glieder, die wieder aus Halbinseln und Inseln bestehen. Halbinseln sind Stücke, die vom Rumpf mehr oder weniger deutlich durch Meeresgrenzen abgetrennt sind. Sie können entstehen entweder infolge einer positiven Niveauverschiebung durch Abgliederung eines Teiles, in dem sich dann der Bau des Rumpfes fortsetzt (abgegliederte Halbinseln, z. B. Istrien), oder durch Angliederung eines fremden Teiles durch eine negative Niveauverschiebung (angegliederte Halbinseln, z. B. Vorderindien).

Inseln sind kleine vom Meer umgebene Landstücke, die entweder vom Festland abgetrennt worden sind (festländische oder Kontinentalinseln), oder aber vom Meeresgrund aus emporgewachsen sind (ursprüngliche Inseln). Nach der Lage unterscheidet man küsten- oder festlandnahe und ozeanische Inseln.

Senkungen, Brucherscheinungen und die Erosion des Meeres sind die Gründe der Abtrennung; Hebung, Aufschüttung, vulkanische Tätigkeit und Riffbildung durch Organismen die des Wachstums. Für die Zuspitzungen des Rumpfes der Kontinente wird der Name Endländer angewendet (Südafrika). Verbindungsstücke zwischen Kontinenten sind Zwischenländer (Zentralamerika), die im kleineren Maßstab als Landengen oder Isthmen bezeichnet werden (Isthmus von Sues). Das Maß der Gliederung eines Kontinentes wird gegeben durch den Vergleich des Flächeninhaltes der Glieder zum Rumpf. In Prozenten der Gesamtfläche erhält man folgende Zahlen:

(siehe oben nächste Seite.)

Dagegen gibt die Küstenentwickelung das Verhältnis der Küstenlänge eines Kontinentes zum kleinsten möglichen Umfang

Digitized by Google

	Halbinseln	Inseln	Glieder
Europa	27,0	7,9	34,9
Asien	17,9	6,1	24,0
Afrika	0,0	2,1	2,1
Australien	4,7	14,6	19,3
Nordamerika	8,5	17,0	25,5
Südamerika	0,3	0,8	1,1

bei gleicher Fläche. Wird dieser als 1 gesetzt, so ergeben sich folgende Werte:

Europa	3,55	Afrika	1,64
Asien	3,19	Nordamerika	4,86
Australien	2,01	Südamerika	1,96

Die für anthropogeographische Untersuchungen wichtige Meeresferne oder den mittleren Küstenabstand findet man dadurch, daß man in die Kontinente Kurven gleichen Küstenabstandes einzeichnet. Die so entstehenden Zonen werden ihrer Fläche nach ausgemessen und auf graphischem Weg der mittlere Abstand bestimmt.

	Mittlerer Küstenabstand in km	Größter Küstenabstand in km	M : G. 1:
Europa	340	1550	4,6
Asien	770	2400	3,1
Afrika	670	1800	2,1
Australien	350	920	2,6
Nordamerika	440	1650	3,8
Südamerika	540	1600	3,0

In den am Schluß gegebenen Verhältniszahlen ist der Einfluß der Größe des Kontinents ausgeschaltet.

4. Der vertikale Aufbau. Gliedert man das ganze Festland in verschiedene Höhenstufen und berechnet deren Fläche, so erhält man folgende Werte, die in der vorletzten Spalte der untenstehenden Tabelle in Prozenten der Erdoberfläche, in der letzten in solchen des Festlandes gegeben sind:

8840—3000 m	= 5 Mill. km²	= 1%	= 3,4%
3000—2000 m	= 6 „ „	= 1,2%	= 4,0%
2000—1000 m	= 21 „ „	= 4,1%	= 14,1%
1000— 200 m	= 66 „ „	= 12,9%	= 44,3%
200— 0 m	= 51 „ „	= 10,0%	= 34,2%

Die beiden Stufen von 1000 m bis zum Meeresspiegel nehmen also 78,5 % des Festlandes ein, die Höhen über 1000 m nur 21,5 %. Diese Verhältnisse werden am besten verständlich durch die Konstruktion einer sogenannten hypsographischen Kurve, bei der die Flächen der einzelnen Höhenstufen als Abszissen, die entsprechenden Höhen als Ordinaten abgetragen werden. Man erhält dadurch eine durch eine Kurve begrenzte Profilfläche, die dem Rauminhalt der Erhebungen entspricht.

Man kann dann das Kulminationsgebiet von 1000 m an aufwärts bis zum Endpunkt in 8840 m, dem Mt. Everest im Himalaya, und die im Gegensatz dazu besonders von 200 m an flach abfallende Kontinentaltafel unterscheiden. Bei einer Verlängerung der Kurve unter den Meeresspiegel sieht man, daß die Kontinentaltafel erst bei —200 m ihr Ende findet. Diese Tiefenlinie bezeichnet den Rand der Kontinente gegen den Kontinentalabhang, der zwischen 2000 und 3000 m in die Tiefseetafel übergeht.

Für die einzelnen Kontinente ergeben sich in drei Stufen — einer Hochstufe über 2000 m, einer Mittelstufe von 2000 m bis 200 m und einer Unterstufe unter 200 m — folgende Werte (in Prozenten der Fläche).

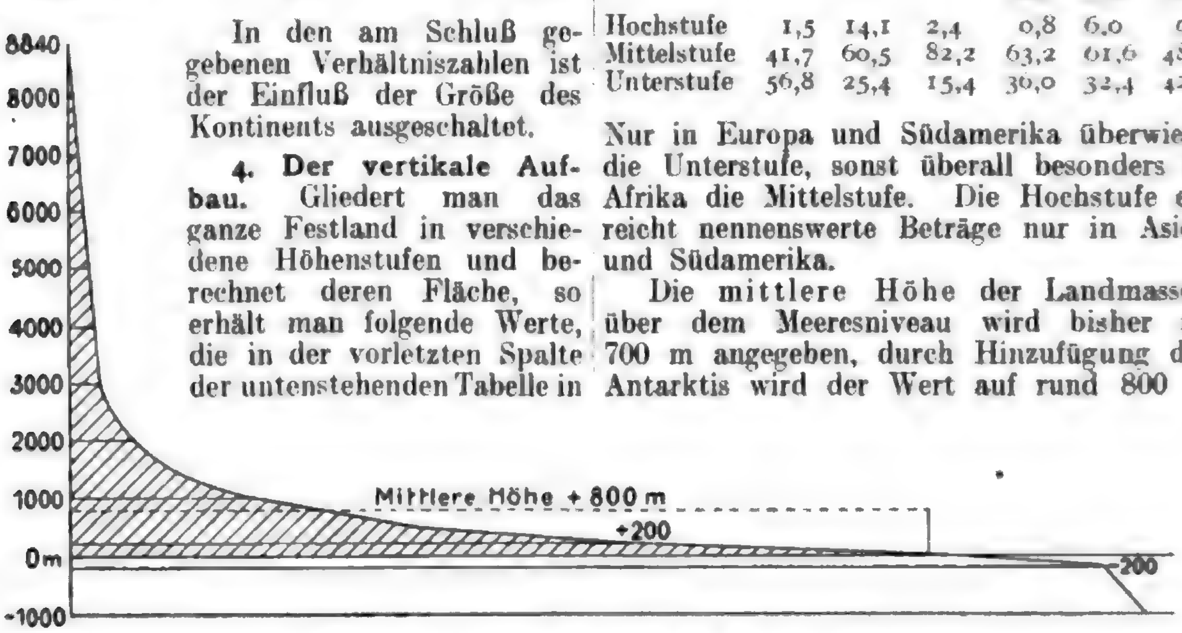
	Europa	Asien	Afrika	Australien	Nordamerika	Südamerika
Hochstufe	1,5	14,1	2,4	0,8	6,0	9,0
Mittelstufe	41,7	60,5	82,2	63,2	61,6	48,4
Unterstufe	56,8	25,4	15,4	36,0	32,4	42,5

Nur in Europa und Südamerika überwiegt die Unterstufe, sonst überall besonders in Afrika die Mittelstufe. Die Hochstufe erreicht nennenswerte Beträge nur in Asien und Südamerika.

Die mittlere Höhe der Landmassen über dem Meeresniveau wird bisher zu 700 m angegeben, durch Hinzufügung der Antarktis wird der Wert auf rund 800 m gesteigert. Für die einzelnen Kontinente sind die Zahlen folgende:

	m		m
Europa	300	Nordamerika	700
Asien	950	Südamerika	580
Afrika	650	Antarktis	2000
Australien	350		

Das Volumen des Festlandes beträgt dem-



Hypsographische Kurve des festen Landes.

Digitized by Google

nach 104,3 Mill. km^2 (149.0,7) oder 119,2 Mill. km^2 (149.0,8). — Da die mittlere Tiefe des Meeres zu 3700 m berechnet wird, so erhält man einen Landblock von 670 Mill. km^3 [149.(3,7 + 0,8)] und einen Wasserblock von 1336 Mill. km^3 [361 × 3,7], also ein Verhältnis beider von 1:2 (vgl. den Artikel „Meere“).

5. Die Reliefformen des Festlandes. Nach orographischen Gesichtspunkten teilt man die Oberflächenformen des Festlandes ein in Ebenen oder Flachböden und in Landerhebungen. Einzelne Landerhebungen bilden Berge, ausgedehntere Gebirge. Je nach der Form des Umrisses und der Gehänge werden unterschieden Kegelberge und Kammgebirge, Kuppenberge und Rückengebirge, Tafelberge und Plateaugebirge. Daneben spricht man von einem Massen- und einem Kettengebirge. Eine Landstufe bezeichnet einen einseitigen Abfall einer Fläche zu einer tieferliegenden. Der Einteilung nach der Höhe entsprechen das Hochland und Tiefland mit einer Grenze von 200 m. Eine Art des Tieflandes bilden die Depressionen, d. h. unter dem Meeresspiegel gelegene Teile des Festlandes. Liegt nur der Boden eines Sees unter dem Meeresspiegel, so nennt man die Einsenkung eine Kryptodepression (Baikal-See). Bei echten Depressionen dagegen liegt auch die zutagetretende Fläche unter dem Meeresspiegel. Die tiefste Depression ist das Jordantal mit dem toten Meer — 394 m, die größte das Gebiet des Kaspi-Sees. Die Einteilung des Hochlandes in Mittel- und Hochgebirge mit einer ungefähren Grenze bei 1300 m war von europäischen Verhältnissen abgeleitet. Da aber bei der Ausbildung von Mittel- und Hochgebirgsformen nicht nur die Höhenlage mitspricht, ist die Grenze der absoluten Höhe nach für andere Gebiete nicht brauchbar und wird besser durch den relativen Höhenunterschied zwischen Gipfel- und Talhöhe von ungefähr 1000 m ersetzt. Die genetische Einteilung geht von den Grundformen der Flachschichtung und dem Faltengebirge aus; eine dritte fremde Art sind die vulkanischen Berge. Die Grundformen werden durch Brucherscheinungen verändert und durch die Erosion, deren Endziel die Abtragung der Erhebungen nach Ablauf eines geographischen Zyklus ist, umgestaltet. Durch Ineinandergreifen dieser Faktoren entsteht ein genetisches System der Oberflächenformen des Festlandes (vgl. den Artikel „Flüsse“).

Im allgemeinen kann das gesamte Festland in drei Gruppen eingeteilt werden, den Faltengürtel, die boreale und die australe Zone. Der Faltengürtel besteht aus einer Zone von Faltengebirgen aus den jüngsten Faltungsperioden der Erde, er umgibt den pazifischen Ozean im Norden, Osten und Westen, im amerikanischen Faltengürtel, und im Gebiet der ostasiatischen und der insularen australischen Bögen. Von Zentralasien zieht er, nach Westen schmäler werdend, durch Vorderasien nach Europa und endet erst im appalachischen Gebirgssystem in Nordamerika. In den anderen Zonen ist die Faltung längst erloschen, die Faltengebirge sind abgetragen, und Gebirge nur durch Brucherscheinungen, Erosion und Vulkanismus gebildet worden. Daneben sind Tafel- und Tiefländer weit verbreitet. Zur borealen Zone gehören das nördliche Eurasien, Nordamerika mit Ausnahme des Westens und der Appalachen. Die australe wird gebildet vom östlichen Südamerika, von Afrika mit Ausnahme der Atlasländer, Arabien, Syrien, Vorderindien, Australien und der Antarktis. Der Faltengürtel hat 42, die boreale Zone 37 und die australe 70 Mill. km^2. Den durch die großen kontinentalen Wasserscheiden getrennten Abdachungen nach zerfällt das Festland in eine pazifische Abdachung mit 40,3 %, eine atlantische mit 35,3 % und eine indische mit 18,3 %. Den Rest bilden abflußlose Binnengebiete, vor allem im Wüsten- und Steppengürtel und im Innern von Australien mit 6 %.

Literatur. **H. Wagner,** *Lehrbuch der Geographie, 9. Aufl., 1. Bd., Hannover und Leipzig 1913.* — **A. Supan,** *Grundzüge der physischen Erdkunde, 5. Aufl., Leipzig 1911.* — **A. Penck,** *Morphologie der Erdoberfläche, 2 Bde., Stuttgart 1894.* — **Derselbe,** *Die Erdoberfläche, Scobels Geographisches Handbuch, 5. Aufl., 1. Bd., Bielefeld und Leipzig 1909.* — **W. M. Davis,** *Die erklärende Beschreibung der Landformen, Leipzig 1912.* — **E. de Martonne,** *Traité de Géographie Physique, Paris 1909.*

G. W. v. Zahn.

Fette, Oele, Seifen.

1. Definition. 2. Fette, Oele: a) Nicht trocknende Oele. b) Trocknende Oele (Firnisse). 3. Aetherische Oele. 4. Schmieröle. 5. Mineralschmieröle. 6. Seifen.

1. Definition. Mit dem Namen „Fette und Oele“ werden eine große Anzahl von durch hohe Viskosität ausgezeichneten Verbindungen bezeichnet, die sich im Tier- und Pflanzenreiche weit verbreitet finden und denen ein bedeutendes biologisches, technisches und volkswirtschaftliches Interesse zukommt. Vom chemischen Standpunkt aus erscheinen die eigentlichen Fette und Oele als esterartige Verbindungen des dreiwertigen Alkohols Glyzerin, $C_3H_5(OH)_3$, im weiteren Sprachgebrauch aber bezeich-

Digitized by Google

net man mit dem Namen „Oele“ noch eine ganze Anzahl von chemisch durchaus verschiedenen Verbindungen. Hierher gehören die ätherischen Oele, die Schmieröle Harz- und Teeröle usw., welche im Anschluß an die eigentlichen Fette und Oele im folgenden kurz geschildert werden sollen. In chemischer Beziehung stehen die Fette und Oele ferner noch den Wachsen sehr nahe, welche vorzugsweise als esterartige Verbindungen von ein- und zweiwertigen, in Wasser nicht löslichen, hochmolekularen Alkoholen, wie Cerylalkohol $C_{26}H_{54}O$, Myricylalkohol $C_{30}H_{62}O$, aufzufassen sind.

2. Fette Oele. Fette. 2a) Nicht trocknende Oele. Eine Unterscheidung der Fette nach physikalischen Gesichtspunkten allein ist nicht möglich; vor allem erscheint es nicht angängig, auf Grund der verschiedenen Konsistenz der flüssigen und festen Fette, von welchen die ersteren vielfach allein als Oele bezeichnet werden können, eine Einteilung in verschiedene Klassen zu treffen, da die Konsistenz nur von der Temperatur abhängig ist, so daß z. B. Palmkernöl, Kokosöl und andere Fette in tropischen Ländern als flüssige Fette, in den nördlichen Ländern dagegen als feste Fette zu bezeichnen sind. Viel zweckmäßiger dagegen erscheint eine auf chemischen Tatsachen beruhende Unterscheidung: alle Oele und Fette pflanzlichen Ursprungs enthalten nämlich kleine Mengen (meist 0,1 bis 0,3 % und eventuell auch etwas mehr) eines hoch molekularischen Alkohols der aromatischen Reihe, des Phytosterins $C_{26}H_{44}O$, während sich in allen tierischen Fetten ein isomerer Alkohol, das Cholesterin $C_{26}H_{44}O$, wenn auch meist nur in kleinen Mengen, stets nachweisen läßt. Es ergeben sich demnach die beiden Hauptabteilungen

I. pflanzliche Fette (phytosterinhaltig),
II. tierische Fette (cholesterinhaltig).

Die pflanzlichen, bei gewöhnlicher Temperatur flüssigen Fette oder Oele kann man dann weiter in folgende Untergruppen teilen:

a) nicht trocknende Oele mit einem hohen Gehalt an Oelsäure, wie Olivenöl, Mandelöl, Erdnußöl.

b) Oele der Ricinolsäurereihe mit einem besonders hohen Gehalt an Oxysäuren, wie Ricinusöl.

c) schwach trocknende Oele (Kruziferenöle).

d) halb trocknende Oele mit großem Gehalt an Linolsäure neben Oelsäure, wie Maisöl, Bucheckernöl, Sesam- und Kottonöl.

e) trockende Oele mit hohem Gehalt an Linol- und Linolensäure, welche sich durch sehr hohe Jodzahlen (vgl. unten die Untersuchungsmethoden der Fette und Oele) auszeichnen, wie z. B. Leinöl und Hanföl.

Die pflanzlichen bei gewöhnlicher Temperatur festen Fette unterscheidet man nach ihrem Gehalt an Glyceriden nicht flüchtiger Säuren, wie z. B. Japanwachs und Muskatbutter, von denjenigen mit einem hohen Gehalt an flüchtigen Säuren, wie Kokosfett und Palmkernöl.

Bei den tierischen Oelen unterscheidet man die Oele von Landtieren, wie Klauenöl, Talg- und Schmalzöl, welche vorwiegend Oelsäure enthalten, und die an stark ungesättigten und trocknenden Säuren reichen Oele von Seetieren, welche meist auch Trane genannt werden. Bei den festen tierischen Fetten unterscheidet man stearinreiche feste Fette, welche keine flüchtigen Fettsäuren enthalten, wie z. B. Rinder- und Hammeltalg, und Fette mit einem größeren Prozentsatz an flüchtigen Fettsäuren, wie sie beispielsweise das Butterfett aufweist.

Die außerordentliche Verschiedenheit der einzelnen Fette und Oele in physikalischer und chemischer Hinsicht beruht auf der Verschiedenheit und dem mehr oder weniger großen Betrag an einzelnen Fettsäuren, welche mit Glycerin verestert in dem einzelnen Fett enthalten sind. Nach der umkehrbaren Gleichung

$$C_3H_5\begin{cases}OH\\OH\\OH\end{cases} + 3ROH = C_3H_5\begin{cases}OR\\OR\\OR\end{cases} + 3H_2O$$

Glycerin Fettsäure Normales Triglycerid

entsteht aus Glycerin und Fettsäuren ein normales Glycerid, während umgekehrt auch die Fette unter bestimmten Bedingungen ganz oder teilweise in Glycerin und Fettsäuren gespalten werden, ein Vorgang, der von großer technischer Bedeutung ist und auf dem eine Reihe von Industrien, wie die Seifen- und Kerzenindustrie, beruhen (vgl. unten die Seifen). Die große Mehrzahl der natürlichen Fette besteht der Hauptsache nach aus gemischten Glyceriden, indem mehrere Säuren mit dem dreiwertigen Alkohol Glycerin zu Estern zusammengetreten sind. So kennt man z. B. Oleodipalmitin, Oleodistearin (d. h. monoölsaures dipalmitinsaures Glycerin), aber auch neutrale Ester wie Tristearin, Tripalmitin und Triolein (dies sind die wichtigsten in den Fetten vorkommenden Verbindungen) sind aus natürlichen Fetten in reinem Zustand gewonnen worden. Je nachdem die Fette mehr Stearin oder mehr Olein enthalten, erscheinen sie bei gewöhnlicher mittlerer Temperatur flüssig oder fest. Mono- und Diglyceride finden sich in den natürlichen Fetten nicht, sind aber synthetisch dargestellt worden, und ihre vorübergehende Existenz ist bei dem stufenweise erfolgenden Abbau der normalen

Digitized by Google

Triglycerinester zu Diglyceriden, Monoglyceriden und schließlich zu Glycerin und Fettsäure neuerdings mit Sicherheit nachgewiesen worden.

Die wichtigsten Fettsäuren, nach Gruppen geordnet, welche in Fetten und Oelen nachgewiesen wurden, sind im folgenden aufgeführt.

1. Säuren der Zusammensetzung $C_nH_{2n}O_2$:

Essigsäure $C_2H_4O_2$ (sehr selten), Buttersäure $C_4H_8O_2$ (im Butterfett), Isovaleriansäure $C_5H_{10}O_2$ (im Delphintran), Kapronsäure $C_6H_{12}O_2$ (im Kokosöl), Kaprylsäure $C_8H_{16}O_2$ (im Menschenfett und Kokosöl), Kaprinsäure $C_{10}H_{20}O_2$ (im Palmkernöl und Kokosöl), Laurinsäure $C_{12}H_{24}O_2$ (im Kokosöl und Lorbeeröl), Myristinsäure $C_{14}H_{28}O_2$ (in der Muskatbutter). Fast in allen Fetten kommen dagegen vor: Palmitinsäure $C_{16}H_{32}O_2$ und Stearinsäure $C_{18}H_{36}O_2$; ferner Arachinsäure $C_{20}H_{40}O_2$ (vor allem im Erdnußöl) und Cerotinsäure $C_{26}H_{52}O_2$ (im Bienenwachs).

2. Säuren der Zusammensetzung $C_nH_{2n-2}O_2$

Tiglinsäure $C_5H_8O_2$ (im Krotonöl), Physetölsäure $C_{16}H_{30}O_2$ (im Walrat), Rapinsäure $C_{18}H_{34}O_2$ (im Rüböl) und Erukasäure $C_{22}H_{42}O_2$ in dem gleichen Oel. Fast in allen Oelen, tierischen und pflanzlichen kommt ferner die zu dieser Gruppe gehörige Oelsäure $C_{18}H_{34}O_2$ vor.

3. Säuren der Zusammensetzung $C_nH_{2n-4}O_2$

Linolsäure $C_{18}H_{32}O_2$, welche den Hauptbestandteil der trocknenden Oele bildet.

4. Säuren der Zusammensetzung $C_nH_{2n-6}O_2$

Linolensäure $C_{18}H_{30}O_2$, ebenfalls in den trocknenden Oelen und die isomere Jecorinsäure $C_{18}H_{30}O_2$ im japanischen Sardinentran.

5. Säuren der Zusammensetzung $C_nH_{2n-2}O_3$

(hydroxylierte Säuren) Ricinolsäure $C_{18}H_{34}O_3$ (im Ricinusöl).

6. Säuren der Zusammensetzung $C_nH_{2n}O_4$

(dihydroxylierte Säuren) wie Dioxystearinsäure $C_{18}H_{34}(OH)_2O_2$ (im Ricinusöl) und Lanocerinsäure $C_{30}H_{60}O_4$ (im Wollfett).

Vorkommen der Fette und Oele.

a) In der Pflanze.

Die pflanzlichen Fette und Oele finden sich in der Natur, sowohl bei höheren wie bei niedrigen Pflanzen gleich weit verbreitet. Sie treten nicht nur in bestimmten Pflanzenteilen auf, sondern kommen in unterirdischen und oberirdischen Wurzeln, Blättern und selbst vereinzelt in Blütenorganen vor. Besonders häufig sind sie in Samen, wo sie allein oder meist mit anderen Substanzen zusammen als Reservestoffe abgesetzt werden, um dem heranwachsenden Embryo später bei der Keimung als erste Nahrung zu dienen. Bisweilen treten die fettigen Substanzen aber auch in solchen Pflanzenteilen auf, die ihrer Entstehung nach aber nicht mehr zum Samen, sondern schon zur Frucht zu rechnen sind. Dies ist z. B. der Fall bei der Olive, wo das den inneren Steinkern umgebende grünliche und saftige Fruchtfleisch reichliche Mengen eines gelben Oeles enthält.

Ueber die Entstehung der Fette im Innern der einzelnen Pflanzenzellen sind genaue Tatsachen noch nicht bekannt und dürften bei der Schwierigkeit dieser Frage wohl auch nicht so bald aufgefunden werden. Wahrscheinlich kann die Bildung auf verschiedene Weise vor sich gehen, entweder durch Umwandlung von Kohlenhydraten, namentlich von Stärke, Glukose und Cellulose oder durch Spaltung und Zersetzung von Eiweißstoffen.

Für die Oelgewinnung kommen, entsprechend ihrem größeren Fettgehalt, fast ausschließlich die Samen und Früchte der in den südlichen Ländern gewonnenen Pflanzen in Betracht, während im gemäßigten Klima viel ölärmere Saaten geerntet werden. Aus den Tropen kommen beispielsweise die Kokos- und Palmkerne, der Ricinussamen, die Baumwollsaat usw. Im Samen selbst befindet sich das Oel in das Protoplasma eingelagert in der Form kleinster Kügelchen, neben Proteinkörnern.

Im folgenden sind die Durchschnittszahlen des Fettgehalts einiger wichtiger Oelsaaten und Früchte angegeben:

	%
Fruchtschalen der Kokosschale	40—45
Fruchtfleisch der Oelpalme	65—72
Samenkerne der Oelpalme	45—50
Samen des Hanfs	30—35
Samen und Fruchtfleisch der Oliven	40—60
Samen der Erdnuß	45—50
Samen des Mohns	41—50
Leinsamen	35—42
Samen der Ricinusstaude	46—53
Samen von Kakao	44—47
Samen vom Butterbaum (Sheabutter)	45—48
Samen von Sesam	50—55
Samen der Baumwolle	24—26
Sojabohne	15—23

b) Im Tierreich.

Im Tierkörper sind die Fette meist in fester Form enthalten. Eine Ausnahme bilden

Digitized by Google

jedoch die Seetiere, bei denen sich auch flüssige Oele finden. Das Fett ist im Tierkörper zum größten Teil in ausgedehnten Gewebsschichten, dem eigentlichen Fettgewebe, abgelagert. Dieses Fettgewebe besteht aus zahlreichen aneinander gereihten Zellen, die mit Fett erfüllt sind und von einer Membran umgeben werden. Letztere ist selbst sehr widerstandsfähig gegen chemische Einflüsse; sie wird hingegen vom Magensaft leicht verdaut. Im lebenden Organismus ist das Fett im flüssigen Zustand enthalten und erst nach dem Tode tritt Erstarrung ein. In den tierischen Fetten liegen meist Neutralfette vor, die im allgemeinen nur einen geringen Prozentsatz von freien Fettsäuren aufweisen, während bei den pflanzlichen Fetten im Gegenteil das Auftreten freier Fettsäuren ziemlich verbreitet ist. Die tierischen Fette bestehen in der Hauptsache aus gemischten Glyceriden der Stearin-, Palmitin- und Oelsäure, und nur in vereinzelten Fällen sind auch Glyceride flüchtiger Fettsäuren, nämlich der Butter-, Capron-, Capryl- und Caprinsäure, nachgewiesen worden. Der wechselnde Gehalt an Tristearin, Tripalmitin und Triolein bedingt auch hier die wechselnden chemischen und physikalischen Eigenschaften, welche gewissen, zum Teil bekannten, zum Teil noch unbekannten physiologischen Zwecken angepaßt sind. So bedingt ein größerer Gehalt eines Fettes an Olein, daß der Schmelzpunkt niedriger liegt, und daher sind auch die Fette der Kaltblüter reicher an Oelsäure.

Von wesentlichem Einfluß auf die Menge des Fettgewebes und die Zusammensetzung des Fettes ist ferner bei den einzelnen Tiergattungen die Fütterungsweise, sowie die äußeren Lebensbedingungen. Auch das Fett der verschiedenen Körperteile weist verschiedene Zusammensetzung auf.

Ein technisch besonders wichtiges Material zur Gewinnung von Fetten stellen ferner die Knochen dar, die außer auf Fett noch auf Leim und Phosphate besonders verarbeitet werden.

Außer den Neutralfetten und Fettsäuren kommen im Tierkörper noch eine Reihe von Substanzen vor, welche den Fetten so ähnlich sind, daß sie gewöhnlich zu ihnen gerechnet werden. Es sind das die in ihrer Konstitution noch nicht vollständig aufgeklärten Cholesterine, die Lecithine, Cerebroside und Protagone.

Die Frage nach der Entstehung der Fette im tierischen Organismus ist ebenfalls noch, wie bei den Pflanzen, außerordentlich strittig, und die Anschauungen der Physiologen gehen darüber sehr auseinander. Sicher ist nur, daß der Organismus aus dem Fett der Nahrung sein Fettmaterial bezieht, das er als solches verbrennen oder aufstapeln kann. Ferner ist sicher, daß das Fett der Nahrung nicht die einzige Quelle des Körperfettes ist und daß Fettbildung aus Kohlenhydraten und Eiweißverbindungen möglich ist. Was die Verdauung und Resorption der Fette anbetrifft, so nimmt man an, daß diese vor allem unter dem Einfluß der Lipase, des fettspaltenden Ferments im Darm erfolgt, welche die Fette in Glycerin und freie Fettsäure zu zerlegen vermag. Andererseits tritt wiederum unter dem Einfluß der Schleimhäute des Dünndarms eine Rückbildung der Fette aus Glycerin und Fettsäure auf. Die wesentliche Fettverdauung findet erst im Darm selbst statt, in dem zunächst eine Emulgierung des Fettes vor sich geht, der dann eine Spaltung in Glycerin und Fettsäure folgt, während das durch Synthese entstandene Fett schließlich resorbiert wird.

Der hohe Wert der Fette für die menschliche Nahrung beruht auf verschiedenen Ursachen; besonders wichtig ist der hohe Verbrennungswert derselben, der im Durchschnitt 9,1 Calorien pro g beträgt, gegenüber 4,2 Cal. bei Eiweißkörpern und Kohlehydraten. Dieser hohe Caloriengehalt der Fette, der dieselben zu einer vorzüglichen Energiequelle im tierischen Haushalt macht, erklärt es, warum die Bewohner kälterer Gegenden eine fettreichere Nahrung zu sich nehmen als die wärmerer Länder. Physiologisch sehr wichtig ist ferner die Tatsache, daß die Fette auch die Kohlenhydrate beim Verbrennungsprozeß im Organismus weitgehend vertreten können. Wenn eine dieser Nahrungsmittelgruppen dem Körper entzogen wird, so tritt die andere dafür ein. Entzieht man beide Gruppen, so greift der Organismus zunächst seinen Vorrat an Kohlehydraten an und dann erst die chemisch widerstandsfähigeren Fettbestände. Einen Ersatz der Eiweißkörper vermögen die Fette aber nicht zu liefern. Wird die Eiweißnahrung dem Körper völlig entzogen, so tritt ein Stickstoffzerfall ein, der durch Fette zwar herabgesetzt, aber nicht völlig aufgehalten werden kann.

Ueber den Abbau der Fette im Organismus selbst ist sehr wenig bekannt, von der einzigen Tatsache abgesehen, daß dieser Abbau unter Bildung von Acetonverbindungen vor sich gehen kann.

Eigenschaften der Fette und Oele.

Was die Eigenschaften der Fette anbetrifft, so weisen die zahlreichen Vertreter dieser Gruppe neben einer Reihe allgemeiner Eigenschaften auch besondere Eigentümlichkeiten auf, welche durch die verschiedene Zusammensetzung und die mannig-

Digitized by Google

faltigen Beimengungen bedingt sind. Reine Fette sind farb-, geruch- und geschmacklos, während die natürlichen Fette und die aus den verschiedenen Rohstoffen isolierten Produkte meist eine bestimmte Farbe und einen spezifischen Geruch aufweisen. Die Farbe der Fette, welche durch Pflanzenfarbstoffe hervorgerufen ist, schwankt von weiß und gelb bis rot (Palmöl) und braun (Cottonöl). Die Raffination der Pflanzenfette und -Oele hat vor allem die Aufgabe, diese Farbe sowie den Geruch zu entfernen, da vor allem in der Industrie der Speiseöle helle, geruchlose Oele verlangt werden.

Das spezifische Gewicht der Fette liegt zwischen 0,91 bis 0,94, ist demnach niedriger als das des Wassers, während die Viskosität bedeutend größer ist. Setzt man die Viskosität des Wassers bei 17,5° = 1, so ergibt sich für Leinöl eine Viskosität von 9,7, für Olivenöl von 21,6 und für Ricinusöl von 203,3 (s. unten bei den Schmierölen).

Die Konsistenz der Fette ist im allgemeinen um so größer, je höher der Schmelzpunkt liegt. Als obere und untere Grenzen für Fette und Oele gelten —27°, der Erstarrungspunkt des Nußöls, und ca. +55° der Schmelzpunkt des Hammeltalgs. Eine charakteristische Erscheinung, die übrigens bei vielen Fetten zu beobachten ist, stellt das Auftreten eines doppelten Schmelzpunktes dar; nach Böhmer beruht diese Erscheinung auf physikalischer Isomorphie oder Dimorphie und entspricht den Erscheinungen beim Schwefel und bei der Kieselsäure.

Die meisten Fette sind in Wasser praktisch unlöslich; eine Ausnahme bilden nur solche Fette, welche Fettsäuren von niedrigem Molekulargewicht enthalten, wie Butter, Kokosöl, Palmkernöl und andere. Andererseits besitzen die Fette jedoch ein gewisses Lösungsvermögen für Wasser, das beim Erhitzen wieder entfernt werden kann. In kaltem Alkohol lösen sich die Fette mit Ausnahme von Ricinusöl, Kroton- und Olivenkernöl nur schwierig, während heißer Alkohol ein gutes Lösungsmittel für die meisten Fette darstellt. Weitere gute Fettlösungsmittel sind Aether, Schwefelkohlenstoff, Chloroform, Benzol, Trichloräthylen, Petroleum und Petroläther. Eine Ausnahme bildet hier wiederum das Ricinusöl, das in den beiden letztgenannten Lösungsmitteln nur schwer löslich ist. Ihrerseits aber lösen die Fette auch andere Substanzen wie Brom, Jod, Phosphor und Schwefel auf, und eine Reihe der bei derartigen Reaktionen entstehenden Verbindungen besitzt technische Bedeutung.

Gegen Erhitzung verhalten sich die Fette sehr verschieden. Manche können bis auf 250° erwärmt werden, ohne sich zu verändern; bei anderen tritt Polymerisation ein, wie z. B. beim Leinöl, Holzöl, Ricinusöl (vgl. unten die Firnisse). Bei stärkerem Erhitzen zerfallen die Fette unter gewöhnlichem Drucke in Kohlenwasserstoffe, in Kohlensäure und Kohlenoxyd sowie Acroléin, das durch Zersetzung des Glycerins entsteht. Im Vakuum dagegen lassen sich einige Fette unzersetzt destillieren. Destilliert man dagegen unter Anwendung eines Druckes von 20 bis 25 Atm., so entstehen, wie Engler gezeigt hat, unter Umständen aus tierischen Fetten wie Fischtalg, unter Abspaltung von Kohlenoxyd und Kohlendioxyd petroleumartige Kohlenwasserstoffe, das sogenannte synthetische Petroleum, das mit Schwefelsäure raffiniert, dem gewöhnlichen Leuchtpetroleum gleicht. Konzentrierte Salpetersäure wirkt stark oxydiernd auf Fette, während konzentrierte Schwefelsäure gemischte Glyceride bildet, unter denen das bei der Einwirkung der Säure auf Ricinusöl entstehende sogenannte Türkisch-Rot-Oel von großem technischem Interesse ist. Unter Umständen wirkt die Schwefelsäure aber auch verseifend auf die Fette, wobei aus ungesättigten Säuren gesättigte Sulfosäuren entstehen, wie z. B. aus Oelsäure Sulfostearinsäure $C_{18}H_{35}O_2(HSO_3)$, welche beim Behandeln mit Wasserdampf wiederum in feste Oxystearinsäure und Schwefelsäure gespalten wird.

Die wichtige Spaltung der Fette durch Alkalien, Säuren und Fermente ist weiter unten in dem Kapitel „Seife" beschrieben.

Gewinnungsmethoden der Fette und Oele.

a) Die tierischen Fette.

Die wichtigsten tierischen Fette sind der Talg, das Schweinefett und das Knochenfett. Die Gewinnung der beiden ersteren im Großbetriebe beruht auf dem Prinzip des Ausschmelzens aus dem fetthaltigen Rohmaterial, das vor der Verarbeitung stets gereinigt und zerkleinert werden muß. Das in den Zellmembranen eingeschlossene Fett wird dann durch Temperaturerhöhung zum Schmelzen gebracht, wodurch die Zelle gesprengt wird und das Fett ausfließen kann. Die Erwärmung erfolgt dabei entweder indirekt (Trockenschmelze) mit direktem Feuer, im Wasserbad, mittels indirekten Dampfes und heißer Luft oder auch mittels direkten Dampfes. Die Gewinnung des Knochenfetts geschieht entweder durch Behandlung der Knochen mit direktem Dampf in den Knochendämpfapparaten, wodurch das Fett ebenfalls zum Ausschmelzen gebracht wird, oder durch Extraktion mit organischen Fettlösungsmitteln. Letzteres

Digitized by Google

Verfahren wird neuerdings besonders viel benutzt, weil die entfetteten Knochen sich dann ohne weiteres auf Leim und Knochenmehl verarbeiten lassen.

Die wichtigsten tierischen bei gewöhnlicher Temperatur flüssigen Fette und Oele sind das Fischfett, das Leberöl und der Tran, deren Gewinnung meist in ziemlich primitiver Weise durch Auskochen des Rohmaterials mit Wasser erfolgt, wobei sich die Oele als obere Schicht abscheiden. Von sonstigen Fetten, die zum Teil aus Abfallstoffen gewonnen werden, seien noch erwähnt: die Lederfette aus Gerbereien, das Walkfett aus den seifenhaltigen Waschwässern der Spinnereien, die Abfallfette aus städtischen Abwässern usw. und Fette aus tierischen Kadavern.

b) Die pflanzlichen Fette.

Viel größere Bedeutung als die tierischen Fette haben aber gegenwärtig die pflanzlichen Fette und Oele, besonders nach der Entdeckung zahlreicher Vertreter, welche aus tropischen Pflanzen gewonnen werden, erlangt.

Man unterscheidet die Gewinnung aus Oelsaaten und Oelfrüchten. Im Gegensatz zu den tierischen Fetten, welche leicht unter dem Einfluß der Atmosphärilien Zersetzungen anheimfallen und deshalb unmittelbar verarbeitet werden müssen, halten sich die ölhaltigen Samen vieler Pflanzen, die sogenannten Oelsaaten, bei geeigneter Lagerung monatelang, ohne zu verderben. Daher gelingt es, diese Saaten auf weite Entfernungen zu transportieren, und besonders in den nördlichen Ländern beruht die technisch hoch entwickelte Oelindustrie überwiegend auf der Verarbeitung von tropischen Oelsaaten. Zur Gewinnung des Oeles aus dem Samen müssen die Saaten ebenfalls von Beimengungen befreit werden, bevor sie nach erfolgter Zerkleinerung und Entfernung der Schalen in den großen hydraulischen Oelpressen dem Preßverfahren unterworfen werden. Je nachdem es sich um die Gewinnung von Speiseölen oder Oelen für technische Zwecke handelt, erfolgt die Pressung in der Kälte oder in der Wärme. Kalt gepreßte Oele sind stets viel reiner und enthalten nicht jene oft bedeutenden Mengen an Farb- und Futterstoffen, welche warmgepreßte Oele zu Genußzwecken untauglich machen. Die Oelausbeute ist jedoch in der Wärme erheblich höher. Aber auch die in der Wärme ausgepreßten Oele können zu Speisezwecken Verwendung finden, falls sie einer chemischen Raffination unterworfen werden, wobei vor allem durch Behandlung mit Laugen vorhandene Fettsäuren entfernt werden. Der Rückstand bei der kalten und warmen Pressung, welcher je nach dem angewandten Verfahren noch mehr oder weniger Fett enthält, findet als Oelkuchen vielseitige Verwendung zu Futter- und Düngezwecken, da die Oelkuchen stets bedeutende Mengen an Pflanzeneiweiß und Kohlenhydraten neben Fett enthalten.

Im Gegensatz zu den Oelsaaten müssen die Oelfrüchte, wie z. B. die Oliven, an dem Ort ihrer Gewinnung selbst verarbeitet werden. Während die weitere Ausbildung der Oelgewinnungsverfahren aus Saaten und Früchten zurzeit nur wichtige ingenieurtechnische Aufgaben enthält, bildet die Reinigung der Rohöle ein wichtiges chemisches Problem.

Bei den Reinigungsmethoden hat man zu unterscheiden die Entfernung von mechanischen Verunreinigungen, welche entweder durch längeres Stehenlassen in Klärgefäßen erfolgt oder durch Filtration mit Filterpressen unter Druck unter gleichzeitiger Anwendung von wasserentziehenden und -entfernenden Materialien wie Fullererde, Kieselgur, Aluminiumhydrosilikat, Knochenkohle usw. Die stets in den Rohölen enthaltenen Eiweißkörper, Pflanzenschleime und Harze werden mit Hilfe von Säuren, vor allem konzentrierter Schwefelsäure, oder alkalischen Laugen entfernt. Manche Fette müssen auch mit Hilfe von Oxydationsmitteln, wie Bichromaten, Permanganaten und Chlor gebleicht werden. Durch Anwendung dieser Chemikalien wird auch in manchen Fällen eine Geruchsverbesserung der Fette herbeigeführt, die besonders wichtig ist für die aus Abfallstoffen gewonnenen Extraktionsfette. Im allgemeinen liefert die Behandlung der pflanzlichen Rohmaterialien mit Extraktionsmitteln, wie Schwefelkohlenstoff und Benzin, Di-, Tri- und Pentachloräthylen und Tetrachlorkohlenstoff nicht so reine Oele wie das Preßverfahren, weil die genannten Lösungsmittel auch auf die oft unerwünschten Beimengungen lösend einwirken.

Untersuchungsmethoden der Fette und Oele.

a) Physikalische Untersuchung. Die physikalischen Eigenschaften sind ebenso wie die chemischen charakteristisch für die Oele und Fette und in den meisten Fällen genügend konstant, um als Merkmal für die Identifizierung zu dienen und die Entdeckung von Verfälschungen zu ermöglichen. Es gelingt zwar häufig nicht mit Hilfe einer einzigen Konstanten den Nachweis für die Existenz eines Fettes zu erbringen, doch geben mehrere, besonders im Verein mit chemischen Untersuchungen wertvolle Aufschlüsse. Als physikalische Konstante kommen in Betracht: 1. das spezifische

Digitized by Google

Gewicht, 2. der Schmelz-, Tropf- und Erstarrungspunkt, 3. der Lichtbrechungsquotient, 4. die Härte und Zähigkeit, 5. die Löslichkeit, 6. die Färbung, 7. das mikroskopische Aussehen, 8. das optische Drehungsvermögen, 9. die Verbrennungswärme, 10. das elektrische Leitungsvermögen und 11. die Kapillarität. Am häufigsten benutzt man in der Praxis die Bestimmung des spezifischen Gewichtes, des Schmelz- und Erstarrungspunktes, sowie der Refraktion. Oele, welche für Schmierzwecke benutzt werden sollen, müssen vor allem auf ihre Zähigkeit untersucht werden.

b) Chemische Untersuchung. Die chemische Untersuchung dagegen hat vor allem die Aufgabe, den Gehalt eines Fettes an seinen einzelnen Bestandteilen zu ermitteln und andererseits das Verhältnis der einzelnen Fette in Mischungen, die Menge der Zusätze bei Verfälschungen und die Reinheit zu bestimmen. Diese schwierige Aufgabe hat die technische Fettanalyse in neuerer Zeit mit großer Sicherheit gelöst. Die wichtigsten chemischen Methoden, welche dabei benutzt werden, sollen im folgenden im Prinzip kurz dargelegt werden.

Säurezahl. Die Bestimmung der Säurezahl gibt an, wieviel Milligramme Kalihydrat zur Sättigung der in 1 g Fett enthaltenen freien Fettsäure erforderlich sind. Diese Zahl ist jedoch keine konstante, da sie vielmehr wesentlich von der Reinheit und vom Alter der Proben abhängig ist. Sie kann daher auch nicht zur Unterscheidung einzelner Fette herangezogen werden. Frische Fette sind meistens nahezu säurefrei. Beim Lagern aber bildet sich oft freie Säure infolge von Hydrolyse, welche sehr schnell voranschreitet, wenn die Oele oder Fette in Berührung mit Stoffen gelassen werden, die leicht in Gärung oder Fäulnis übergehen. Die tierischen Fette und Oele, insbesondere solche von Landtieren, unterliegen der Zersetzung in freie Säure viel weniger als pflanzliche.

Verseifungszahl. Die Verseifungszahl gibt an, wieviel Milligramm Kalihydrat zur vollständigen Verseifung von 1 g Fett erforderlich sind. Die Verseifungszahl bietet ein einfaches Mittel, um einzelne Fette und Oele zu unterscheiden. Man unterscheidet die drei Klassen:

1. Fette mit niedriger Verseifungszahl, 171 bis 183, meistens nahe 175: Rübölgruppe, Ricinusöl und Traubenkernöl.

2. Fette mit mittlerer Verseifungszahl, nahe 193: hierzu gehört die große Mehrzahl der Fette und Oele.

3. Fette und Oele mit hoher Verseifungszahl, 205 bis 290, die bedingt ist durch einen beträchtlichen Gehalt an flüchtigen Säuren: Butterfett, einzelne Trane, Kokosnußölgruppe.

Jodzahl. Eine wichtige Konstante ist ferner die Jodzahl, welche angibt, wieviel Gewichtsprozente Halogen, berechnet als Jod, ein Fett unter bestimmten Versuchsverhältnissen aufzunehmen vermag. Die Jodzahl bildet demnach ein Maß für den Gehalt eines Fettes an ungesättigten Fettsäuren. Letztere können sich nämlich sowohl in freiem Zustand, als in Form ihrer Glyceride mit Halogenen vereinigen. Die Menge des angelagerten Halogens entspricht bei Säuren mit einer Doppelbindung (Oelsäurereihe) zwei, mit zwei Doppelbindungen (Linolsäurereihe) vier, mit drei Doppelbindungen (Linolensäurereihe) sechs Atomen. Auf der Höhe der Jodzahl beruht auch die wichtige Einteilung der pflanzlichen Oele in trocknende, halb trocknende und nicht trocknende. Als trocknende bezeichnet man die Oele von der Jodzahl 200 bis 120, wie Leinöl, Mohnöl und Holzöl. Halb trocknende Oele, wie Sesamöl, Baumwollsaatöl und Rüböl, haben eine Jodzahl von 120 bis etwa 95. Die Jodzahl der nicht trocknenden Oele, wie Olivenöl, Erdnußöl, Ricinusöl usw., liegt unterhalb 95.

Reichert-Meißlsche Zahl. Die Reichert-Meißlsche Zahl gibt die Anzahl Kubikzentimeter $^1/_{10}$ normaler Lauge an, welche zur Neutralisation der aus 5 g Fett nach dem Reichertschen Destillationsverfahren abgeschiedenen flüchtigen wasserlöslichen Fettsäuren erforderlich sind. Da die meisten Fette sehr wenig flüchtige Säuren enthalten, liegt ihre Reichert-Meißlsche Zahl meist unterhalb 1. Eine hohe Zahl zeigen dagegen das Butterfett (26 bis 32), die Fette der Kokosnußölgruppe (5 bis 8) und Delphintran (60 bis 66). Auch ranzige Fette zeigen übrigens oft einen weit höheren Gehalt an flüchtigen Säuren als die entsprechenden frischen Fette. Die Reichert-Meißlsche Zahl ist von großer Wichtigkeit für die Untersuchung der Speisefette und besonders der Butter, da sämtliche Verfälschungen der Naturbutter diese Zahl erniedrigen.

Hehnerzahl. Die Hehnerzahl gibt den Prozentgehalt eines Fettes an wasserunlöslichen Fettsäuren an. Ihre Kenntnis ist besonders wichtig für die Bestimmung von Rohstoffen der Stearinindustrie und zur Beurteilung von Seifen. Die Hehnerzahl der meisten Fette liegt nahe bei 95. Erheblich niedrigere Zahlen ergeben nur diejenigen Fette, deren Verseifungs- und Reichert-Meißlsche Zahlen besonders hoch sind, wie z. B. Kokosfett 83,8—90,5, Palmkernfett 91, Butterfett 86—88 und Delphintran (vom Kopf) 66,3.

Acetylzahl. Die Acetylzahl gibt die Anzahl von Milligramm Aetzalkali an, die zur Neutralisation der bei der Verseifung von 1 g

Digitized by Google

acetylierter Fettsäuren bezw. acetylierten Fetts gebildeten Essigsäure erforderlich ist. Die Acetylzahl der meisten Fette und Fettsäuren ist gering und beträgt weniger als 10. Beim Altern und Ranzigwerden der Fette kann die Acetylzahl allerdings bedeutend steigen. Es liegt demnach keine Konstante, sondern eine Variable wie die Säurezahl vor. Sehr hohe Acetylzahlen haben die durch einen hohen Gehalt an Oxysäuren gekennzeichneten Oele wie Ricinusöl (153 bis 156) und Traubenkernöl (144). Zum Nachweis dieser Oele ist daher die Acetylzahl sehr geeignet.

Die quantitative Analyse von Fetten oder Fettgemischen, welche keine fremden Bestandteile, wie Harze, Mineralöle, Paraffin usw., enthalten, beschränkt sich meist auf die Bestimmung des Gehalts an folgenden Bestandteilen:

1. freie Fettsäuren, Neutralfett und mittleres Molekulargewicht der freien Fettsäuren,
2. nicht flüchtige und flüchtige Fettsäuren,
3. flüchtige und feste Fettsäuren,
4. Palmitinsäure, Stearinsäure, Arachinsäure und Oelsäure,
5. Oxyfettsäure,
6. Laktone,
7. Unverseifbares
8. Glycerin.

Eine eingehende Beschreibung dieser Bestimmungsmethoden liegt außerhalb des Rahmens dieses Artikels und ist in den der Literatur genannten Handbüchern enthalten.

Verwendung der Fette und Oele.

Die Verwendung der Fette und Oele ist eine außerordentlich mannigfaltige, so daß hier nur eine kurze Uebersicht gegeben werden kann. Eine der ältesten Verwendungsarten ist diejenige als Leuchtmittel in Form von Brennöl, Talgkerzen und Stearinkerzen neben Walrat- und Wachskerzen. Viel wichtiger ist dagegen die Verwendung der pflanzlichen Fette, welche keine gesundheitsschädlichen Stoffe enthalten, zur Herstellung von Speiseölen und Speisefetten. Hierzu dienen vor allem Olivenöl, Erdnußöl, Baumwollsaatöl, Sesamöl, Mohnöl und in geringerem Maße Rüböl und Leinöl. In der Speisefett- und Margarineindustrie findet ferner noch Talg, Kokosnußöl und Palmkernöl Verwendung. Neuerdings hat man durch Behandlung von minderwertigen Fetten und Tranen mit Wasserstoff bei Gegenwart von Katalysatoren wertvolle und geruchlose Produkte (z. B. „Talgol") von hohem Schmelzpunkt hergestellt, welche immer mehr Verwendung in den obengenannten Industriezweigen finden.

Einige Fette und Oele werden ferner als Schmiermittel benutzt, jedoch tritt die Bedeutung dieser Industrie immer mehr zurück gegenüber der zunehmenden Mineral-Schmierölindustrie (vgl. unten die Schmieröle).

Leinöl und andere trocknende Oele benutzt man vor allem zur Herstellung von Firnissen und Lacken, und endlich lassen sich fast alle Oele in der Seifenfabrikation verwenden.

Erwähnt seien endlich noch die sogenannten Gerberfette und Textilöle, unter denen das Türkisch-Rot-Oel, das beim Behandeln des Ricinusöls mit konzentrierter Schwefelsäure entsteht, in der Färberei und im Zeugdruck viel benutzt wird, und eine Reihe von Kautschuksurrogaten, meist als Factis bezeichnet, welche bei der Einwirkung von Schwefel oder Chlorschwefel auf Oele, wie Leinöl, Kottonöl, Ricinusöl, Trane usw., entstehen.

Uebersicht der technisch wichtigen Fette und fette Oele.

Im folgenden ist eine kurze Uebersicht über die technisch wichtigsten Fette und fetten Oele gegeben. Man unterscheidet danach:

I. Pflanzliche nicht trocknende Oele und feste Fette.

Olivenöl aus dem Fleich der Oliven, Olivenkernöl, Erdnußöl, Ricinusöl, Traubenkernöl. Mandelöl, Kokosnußöl, Palmöl (aus dem Fleisch der Früchte), Palmkernöl, chinesischer Talg (Pflanzenwachs), Kakaobutter, Muskatbutter.

II. Pflanzliche halbtrocknende Oele.

Baumwollssaatöl (Cottonöl), Kapoköl, Sesamöl, Maisöl, Leindotteröl, Bucheckernöl, Rüböl, Schwarz- und Weißsenfsaatöl.

III. Pflanzliche trocknende Oele.

Mohnöl, Sonnenblumenöl, Nußöl, Hanföl, Leinöl, chinesisches Mohnöl, Perillaöl usw.

IV. Fette und Oele von Landtieren.

Klauenfette, Knochenöle, Pferdefett, Rindstalg, Hammeltalg, Talgöl, Schweineschmalz, Schmalzöl, Butterfett.

V. Fette und Oele von Seetieren.

Robben- und Walfischtran, Delphin- und Meerschweintran, Menhadentran, Sardinenöl, Dorschlebertran.

Die wichtigsten Konstanten.

Die wichtigsten Konstanten der hauptsächlichsten Fette und Oele sind ferner noch in der folgenden Uebersichtstabelle zusammengestellt:

Digitized by Google

Name des Oels	Spez.-Gew.	Kältepunkt u. Schmelzpunkt	Verseifungszahl	Jodzahl nach Hübl-Waller	Reichert-Meißlzahl	Hehnerzahl	Acetylzahl
Olivenöl	0,914—0,919 bei geringen Sorten 0,920—0,925	einzelne —5° noch fließend, —9° erstarrt, andere schon bei 0° erstarrt	190—193 meist nahe bei 190	79—85 meist 82	0,3 (06)	94—96	4—10
Olivenkernöl	0,918—0,920	—	182—188,5	87—88	—	—	22,5
Erdnußöl	0,9165—0,920	0—3°	189—194	86—98	0,5—1,6	94—96	3,4
Ricinusöl	0,960—0,974	—10 bis —18°	176—183	82—88	1,1—2,8	—	146—156
Mandelöl	0,916—0,920	—10 bis —25°	190—196 (meist nahe an 191	93—102	—	96—97	5,8
Kokosnußöl	0,925—0,938	erstarrt bei 14—23,1°, schmilzt bei 20,3—28°	246—258	8,6—9,4	5,6—7,4	82,4—90,5	0,9—12,3
Palmöl (aus dem Fleisch der Früchte)	0,945—0,956 bei 98°—100° 0,858—0,860	schmilzt je nach Alter und Ursprung zwischen 27 u. 43°	196—207	51—58	0,5—1,87	95—97,0	0,7—0,8
Palmkernöl	0,941—0,952	schmilzt zwischen 23° u. 30°	241—250	10—18	5—7	87,6—91,1	1,9—4,8
Kakaobutter	0,950—0,995 bei 50° 0,892	21—23° schmilzt zwischen 29—34,5°	192—194	34—37	0,3—1,6	94,6	—
Baumwollsaatöl	0,922	3—4°	191—198 meistens nahe bei 195	103—110	0,4—1	95,9—96,2	16,6
Sesamöl	0,922—0,9237	zwischen —3 und —5°	188—195	103—112	1,2	95,6—95,9	11,5
Maisöl	0,9215—0,9256	—10 bis —20°	189—193	119—123	0,33—2,5	83—96	7,8—8,75
Rüböl	0,9123—0,9175	meistens bei 0° talgartig, 5- bis 10 stündige Kühlung und Bewegung nötig	171—179 meistens bei 175	97—105	0,25—0,4	95	6,3
Schwarzsenfsaatöl	0,916—0,920	—5°	174—175	96—107	—	—	—
Mohnöl	0,924—0,927	—15° meist noch flüssig, —18° starr	190—198	134—143	0	95,2	13,1
Sonnenblumenöl	0,924—926	—12° noch flüssig, —17° teilw. erstarrt	188—194	122—125	—	95,0	—
Hanföl	0,925—0,928	—15° noch flüssig —27,5 starr°	190—194	157—166	—	—	7,5—20
Leinöl	0,9305—0,9352	—15° flüssig —27,5° starr	190—195 meistens bei 182	140,5 171—190	0	95,5	8,5
Klauenfette und Knochenöle	0,914—0,916	je nach Herstellung bezw. Stearingehalt weit über und unter 0°	191—203	schwankt je nach Stearingehalt zwischen 44—75	0	—	11,3
Rindstalg	0,943—952	27—35°	193—200	35—44	0,25—0,5	95—96	2,7—8,6
Hammeltalg	0,937—0,940	32,9—41,0°	193—195	35—46	—	95,5	—
Schweineschmalz	0,931—0,938	27,1—29,9°	195—197	60,4—68,4	0,3—0,9	92,8—95,5	—
Robbentran	0,9249—0,9263	—2 bis —3°	189—196	127—152	0,14—0,44	92,8—95,5	—
Walfischtran	0,917—0,9272	unter —2°	188—224	110—128	0,7—2,4	93,5	—
Menhadenöl	0,927—0,933	—4°	—	189—192	148—160	1,2	—
Sardinenöl	0,916—0,934	—	189—192	100—164	—	95,5—97	—

Digitized by Google

2b) Trocknende Oele (Firnisse). Eine Reihe von Pflanzenölen besitzen, wie bereits erwähnt, die Eigenschaft, an der Luft, in dünner Schicht ausgebreitet, nach kurzer Zeit unter Aufnahme von Sauerstoff und Bildung harzartiger Massen einzutrocknen, welche als Firnisse und zur Herstellung von Lacken umfangreiche Verwendung finden. Zu diesen Oelen gehört in erster Reihe das Leinöl, das aus dem Samen des Flachses gewonnen wird, das chinesische Holzöl, das Hanföl, Mohnöl, Sonnenblumenöl und endlich das Sojabohnenöl. Am meisten Benutzung findet das Leinöl, und an ihm sind auch die Erscheinungen der Trocknung, die ihrem chemischen Charakter nach immer noch nicht vollständig erklärt sind, vor allem studiert worden. Man nimmt jetzt an, daß das Trocknen der Oele auf Oxydation und Polymerisationsprozessen beruht, welche die doppelt und dreifach ungesättigten Fettsäureglyceride in den trocknenden Oelen erleiden. Dieser Oxydationsprozeß wird durch das Licht und auch durch die Anwesenheit kleiner Mengen katalytisch wirkender Blei- und Manganverbindungen, die man als Sikkative (Trockner) bezeichnet, erheblich beschleunigt.

Die Herstellung der Firnisse erfolgt entweder durch Erhitzen der Oele auf hohe Temperatur (ca. 250°), wobei stets starkes Schäumen und Entwickelung von ähnlich wie Akroleïn riechenden Substanzen erfolgt, oder bei niederer Temperatur, wenig über 100°, bei Anwesenheit von Linolaten oder Resinaten des Bleies oder Mangans. Die Art und Dauer der Erhitzung ist jedenfalls für die Qualität des gewonnenen Firnisses ebenso wie die Reinheit der betreffenden Oele von ausschlaggebender Bedeutung (Näheres siehe im Artikel „Farben“ bei den Lacken).

3. **Aetherische Oele.** Die ätherischen Oele unterscheiden sich von den fetten Oelen durch die Eigenschaft, daß sie auf Papier gebracht einen bald verschwindenden durchscheinenden Flecken hinterlassen und daß sie in ihrer überwiegenden Mehrzahl mit Wasserdämpfen vollständig flüchtig sind. Ferner sind diese chemisch meist recht kompliziert zusammengesetzten Oele durch einen hervorstechenden Geruch charakterisiert, der ihre umfangreiche Verwendung bedingt. Aetherische Oele finden sich in fast allen Pflanzenteilen, vornehmlich bei Phanerogamen, in den Kräutern, Blüten, Knospen, Blättern, Früchten, Fruchtschalen, Samen, Stengeln, Wurzeln, Hölzern, Rinden, Harzen und Balsamen. Meist sind die Oele in den Pflanzen fertig gebildet enthalten und erfüllen das innere Zellgewebe, den Zellsaft, oder sie treten in der Epidermis auf. Im allgemeinen liefern die einzelnen ölhaltigen Teile einer Pflanze das gleiche ätherische Oel. Eine bemerkenswerte Ausnahme bildet jedoch u. a. der Ceylon-Zimtstrauch, dessen Rinde, Blätter und Wurzeln drei ganz verschiedene ätherische Oele liefern.

Entstehung der ätherischen Oele.

Ueber die Entstehung der ätherischen Oele in der Pflanze ist erst in der Neuzeit einiges bekannt geworden. Als ziemlich sicher darf man annehmen, daß die ätherischen Oele Abbauprodukte des pflanzlichen Organismus sind, welche für den Stoffwechsel nicht weiter in Betracht kommen und daher zur Abscheidung gelangen. Sehr stark beeinflußt wird die Oelbildung auch durch photochemische Vorgänge; so vermag das Sonnenlicht einen erheblichen Einfluß auf die Menge des in einzelnen Pflanzen enthaltenen Oeles auszuüben. Bei unter Lichtabschluß gezogenen Pflanzen nimmt der Gehalt an Oelen sowohl qualitativ wie quantitativ erheblich ab. Auch Witterungseinflüsse vermögen die Entwickelung der Pflanzen und die Eigenschaften der ätherischen Oele erheblich zu beeinflussen. Dies gilt besonders für die aus Blüten und Früchten gewonnenen Oele. Ueber den Zweck der Oele für den pflanzlichen Haushalt nimmt man neuerdings meist an, daß dieselben in erster Linie Schutzmittel gegen tierische Angriffe bieten. Bei den Blüten kommt als weiterer Zweck hinzu, daß die Oele Lockmittel für die Insekten bieten, welche die auf entomophile Bestäubung angewiesenen Blüten besuchen.

Interessante Ausblicke zur Frage der Entstehung der ätherischen Oele eröffnen die Arbeiten von F. Ehrlich.[1]) Dieser Forscher wies bereits vor einigen Jahren nach, daß Hefe mit größter Leichtigkeit aus der weitverbreiteten Aminosäure, dem Phenylglykokoll, den in größter Menge in den Riechstoffen der Rose vorkommenden Phenyläthylalkohol produziert. Er schloß hieraus, daß dieser und andere Riechstoffe der Rose in ähnlicher Weise aus dem Pflanzeneiweiß und seinen Bestandteilen und Spaltungsprodukten hervorgehen. Selbst die Bildung komplizierterer ätherischer Oele und Riechstoffe sowie der Kampher und der Terpene aus Eiweiß wird verständlich, wenn man annimmt, daß die zuerst an den Aminosäuren abgespaltenen stickstoffreien Verbindungen untereinander und mit anderen Pflanzenstoffen Kondensationen eingehen, und daß diese neu entstandenen Substanzen durch bestimmte Enzyme weiteren Spaltungen unterliegen. Im Lichte dieser Anschauungen stellen sich die Riechstoffe in den höheren Pflanzen als für den Organismus

[1]) F. Ehrlich, Ueber die Bedeutung des Eiweißstoffwechsels für die Lebensvorgänge in der Pflanzenwelt (Breslauer Ladenburg-Rede 1911). In der Sammlung Chemischer und chemisch-technischer Vorträge (Ahrens u. Herz) Bd. XVII, 297 bis 310, Stuttgart 1911.

Digitized by Google

unverwertbare Eiweißstoffwechselprodukte dar, welche ähnlich wie z. B. das Fuselöl bei der Hefegärung entstanden sind.

Von chemischem wie von botanischem Interesse ist die Frage, ob innerhalb derselben Pflanzenfamilie die einzelnen Arten dieselben oder ähnlich zusammengesetzte Oele hervorbringen. Dieses ist im allgemeinen nicht der Fall, obwohl z. B. die Oele der Koniferen, der Kruziferen und Alliumarten, sowie vieler Labiaten und Laurazeen durch ähnliche Oele charakterisiert sind.

Klassifikation und Chemische Zusammensetzung.

Eine Klassifikation der ätherischen Oele nach rein chemischen Gesichtspunkten, unter Zugrundelegung der Hauptbestandteile, ist nicht möglich. Auch eine Unterscheidung nach dem Geruch ist undurchführbar, da der charakteristische Geruch meist erst durch das Zusammenwirken mehrerer Einzelbestandteile entsteht, die keineswegs bei der großen Mehrzahl der ätherischen Oele gänzlich bekannt sind. So benutzt man aus rein praktischen Gründen vielfach, da auch die botanischen Einteilungsmethoden versagen, eine Einteilung nach einem sehr äußerlichen Kennzeichen, nämlich nach dem Alphabet.

Die genaue Kenntnis der chemischen Zusammensetzung gehört erst der neuesten Zeit an und ist in erster Reihe durch O. Wallach und seine Schüler, ferner durch A. von Baeyer, Tiemann, Semmler, Bertram, Barbier, Bouveault, Gildemeister, Hesse, Perkin, Walbaum u. a. gefördert worden. Durch diese Arbeiten hat sich herausgestellt, daß fast alle ätherischen Oele eine große Anzahl von chemischen Einzelverbindungen enthalten, deren Abscheidungsmethoden auch erst in neuerer Zeit bekannt geworden sind. So sind beispielsweise im Zitronenöl nicht weniger als 15 Körper (Limonen, Pinen, Phellandren, Camphen, Citral, Citronellal, Octylaldehyd, Nonylaldehyd, Geraniol, Linalool, Terpineol, Geranylacetat, Linalylacetat, Methylheptenon und ein Sesquiterpen) sicher erkannt worden, während im Neroliöl ca. 18 bis 20 Bestandteile, darunter das stickstoffhaltige Indol und der Anthranilsäureester nachgewiesen worden sind. Bisher hat man im ganzen folgende Hauptklassen von Bestandteilen in den ätherischen Oelen nachgewiesen:

1. Methanderivate.
Kohlenwasserstoffe, Alkohole, Aldehyde, Ketone, Säuren und Ester, Schwefel- und Stickstoffverbindungen.

2. Benzolderivate:
Kohlenwasserstoffe, Phenole und Phenoläther, Alkohole, Aldehyde, Ketone, Säuren und Ester, Laktone, stickstoffhaltige und schwefelhaltige Verbindungen.

3. Hydroaromatische Reihe:
Kohlenwasserstoffe, darunter die wichtige Klasse der eigentlichen Terpene $C_{10}H_{16}$ und Sesquiterpene, Alkohole, Aldehyde, Ketone, Oxyde, Säuren, Ester und Laktone.

4. Heterocyklische Reihe:
Sauerstoffhaltige Ringe, z. B. Furfuranderivate und stickstoffhaltige Ringe, wie Pyrrol, Indol usw.

Gewinnungsmethoden.

Zur Oelgewinnung benutzt man drei Hauptmethoden: die Wasserdampfdestillation, die Extraktion und die Pressung.

Wasserdampfdestillation. Die am meisten angewandte und älteste Methode der Oelgewinnung, die Wasserdampfdestillation, beruht auf der Tatsache, daß die ätherischen Oele mit Wasserdämpfen flüchtig sind. Diese Verfahren sind in neuerer Zeit in apparativer Weise außerordentlich vervollkommnet worden, vor allem durch die Benutzung der Vakuumdestillation, welche in der Technik eine große Bedeutung erlangt hat.

Extraktion. Die Methode der Extraktion zur Gewinnung ätherischer Oele, die gegenwärtig noch, vor allem in Südfrankreich, ausgeübt wird, bezweckt hauptsächlich die Isolierung sehr feiner, gegen Wasserdämpfe empfindlicher Blütenöle. Man benutzt drei verschiedene Formen bei der Extraktionsmethode. Entweder wird nämlich, bei der eigentlichen Extraktion, das ätherische Oel den Blüten mittels flüssiger, niedrig siedender Lösungsmittel, wie Aether, Chlormethyl und Schwefelkohlenstoff, entzogen und nach beendigter Extraktion das Lösungsmittel wieder verdampft. Bei dem Verfahren der sogenannten Mazeration werden die Blüten mit warmem, sorgfältig gereinigtem tierischem Fett übergossen, welches das ätherische Oel aufnimmt. Die extrahierten Blüten werden dann entfernt und bis zur Sättigung des Fettes durch frische ersetzt. Nach diesem Verfahren erhält man die wohlriechenden Pomaden. Besonders wichtig ist endlich die dritte Form, das Verfahren der „enfleurage“ das besonders in Grasse (Südfrankreich), ausgeübt wird. Hierbei werden die zu extrahierenden Blüten, vor allem Jasmin- und Tuberosenblüten, zwischen je zwei mit kaltem Fett bestrichene Glasplatten ausgebreitet, wo sie so lange verbleiben, bis sie ihren gesamten Duftstoff an die Fettschichten abgegeben haben. Dann werden sie durch frische Blumen ersetzt, bis das Fett gesättigt ist, das zur Erhöhung der Absorptionsfähigkeit stets mit Spateln mehrfach umgearbeitet wird, wodurch immer neue Fetteile an die Oberfläche kommen. Die nach diesem Verfahren gewonnenen Pomaden sind außerordentlich wertvoll.

Pressung. Endlich wird aus einigen sehr ölreichen Früchten der Citrusarten, aus Bergamotten, Zitronen, Pomeranzen usw. das ätherische Oel durch Pressung gewonnen.

Digitized by Google

Eigenschaften und Untersuchungsmethoden der ätherischen Oele.

Mit wenigen Ausnahmen sind die ätherischen Oele bei gewöhnlicher Temperatur flüssig und meist gelblich bis wasserhell gefärbt; doch gibt es auch einige goldgelbe, hell- bis dunkelbraune, grüne und blaue Oele.

Zur Charakterisierung der einzelnen Oele sind besonders chemische neben physikalischen Untersuchungsmethoden im Gebrauch.

Chemische Untersuchungsmethoden. Die chemischen Untersuchungsmethoden erstrecken sich hauptsächlich auf die quantitative Bestimmung der einzelnen Bestandteile jedes Oels, sowie auf die Anwesenheit etwaiger Verfälschungsmittel. Im einzelnen bestimmt man nach besonderen Methoden den etwaigen Gehalt an freier Säure, an Estern, an Alkoholen und Phenolen, Aldehyden und Ketonen, Methoxyl- und Aethoxylverbindungen. Unter den Verfälschungsmitteln ist besonders wichtig und häufig angewandt das Terpentin, der Spiritus, fette Oele, Mineralöle, Zedernholzöl und Kopaivabalsam.

Die vorzügliche Durchbildung der analytischen Methoden, die vor allem der Firma Schimmel & Co. zu verdanken ist, hat jetzt im Handel die Beachtung ganz bestimmter Normen für die Beurteilung der ätherischen Oele herbeigeführt, so daß gegenwärtig Fälschungen ätherischer Oele meist ohne Schwierigkeit erkannt werden können.

Physikalische Untersuchungsmethoden. Von den physikalischen Untersuchungsmethoden ist besonders wichtig die Bestimmung des spezifischen Gewichts, des optischen Drehungs- und Brechungsvermögens, des Erstarrungspunktes und des Siedeverhaltens, sowie die Untersuchung der Löslichkeit.

Die Verwendung der ätherischen Oele.

Die ätherischen Oele finden vor allem in der Parfümerie zur Herstellung bestimmter einfacherer Riechstoffe Verwendung, welche häufig erst von den übrigen Bestandteilen der einzelnen Oele getrennt werden müssen. Eine Reihe von ätherischen Oelen werden übrigens auch auf synthetischem Wege hergestellt, und zwar durch Mischen der billigeren Einzelverbindungen, deren zweckentsprechendes Mischungsverhältnis man aus der Analyse der natürlichen Oele kennen gelernt hatte. Eine Verdrängung der Naturprodukte durch die synthetischen Oele hat jedoch keineswegs stattgefunden, da mit der Verbilligung derselben der allgemeine Verbrauch sehr gestiegen ist. Zahlreiche Oele dienen ferner zur Herstellung kosmetischer Präparate, wie Mund-, Kopf- und Haarwassern, Haarölen, Zahnpasten und vor allem zur Parfümierung von Seifen. Eine Reihe von Oelen wie Kümmel, Wermut, Baldrian, Nelken- und Sandelholzöl finden Verwendung in der Medizin; das Terpentinöl bildet die Grundlage der Lack- und Firnisindustrie, und verschiedene Oele braucht man in der Likör- und Limonadenfabrikation, in der Konditorei usw.

4. Schmieröle. Die Aufgabe des Schmiermittels — und zwar sowohl der pflanzlichen wie der mineralischen Schmieröle, besteht darin. die aneinandergleitenden Metallflächen der Maschinen und Fahrzeuge vor direkter Berührung, starker Reibung und Abnutzung zu schützen. Je vollkommener diese Aufgabe unter den jeweiligen Temperatur-, Geschwindigkeits- und Druckverhältnissen gelöst wird, und je geringer die bei der Bewegung der Maschinenteile mit zu überwindende innere Reibung des Schmiermittels ist, um so wertvoller erscheint dasselbe in mechanischer Hinsicht. Bis zu den 80er Jahren des 19. Jahrhunderts benutzte man zum Schmieren fast ausschließlich Pflanzen- und Tierfette, wie: Knochenöl, Spermacetiöl und Olivenöl, sowie Rüböl. Von diesen zeigen die drei erstgenannten nur geringe Veränderungen ihrer flüssigen Beschaffenheit in dünner Schicht, während das Rüböl nach einiger Zeit in dünner Schicht klebrig wird. Gegenwärtig sind die Pflanzenöle zu Schmierzwecken sehr zurückgedrängt worden, sodaß sie nur in kleineren Betrieben Verwendung finden. Im Großhandel findet sich als Schmieröl fast nur noch das Knochenöl, das schwer ranzig und sauer wird und infolgedessen Metallteile nicht angreift. Es wird daher mit Vorteil zum Schmieren von feinen mechanischen Werken, z. B. Uhren, benutzt. Ferner werden auch Mischungen von Pflanzenölen und Mineralölen benutzt. Man nennt diese Oele, welche durch Einblasen von Luft bei höherer Temperatur in Rüböl oder Kottonöl entstehen, Compoundöle. Durch den Oxydationsprozeß tritt eine erhebliche Erhöhung der Zähigkeit des Rüböls ein und gleichzeitig auch eine Erhöhung der Dichte. Außer diesen, auch als „geblasene" Oele bezeichneten Mischungen spielen die Pflanzenfette noch eine gewisse Rolle in der Fabrikation der „konsistenten Maschinenfette", welche im allgemeinen aus Kalkseifen von Fettsäuren und Mineralölen bestehen.

5. Mineralschmieröle. Viel größere Bedeutung haben dagegen neuerdings die mineralischen Schmieröle erlangt, welche chemisch zu einer ganz anderen Klasse als die fetten Oele gehören und im wesentlichen aus hochsiedenden Kohlenwasserstoffen der Paraffinreihe bestehen. Sie entstehen bei der Destillation des rohen Erdöls und werden nach Abscheidung des Rohbenzins und des Leuchtpetroleums gesondert aufgefangen. Die über 300° sieden-

Digitized by Google

den Fraktionen, deren Menge bei den amerikanischen Erdölen nur 10 bis 20 %, bei den russischen dagegen 55 bis 70 % und bei den deutschen Oelen sogar 70 bis 90 % betragen kann, müssen zur Verarbeitung auf Schmieröle noch besonders raffiniert werden. Zu diesem Zwecke werden sie im Vakuum oder mit überhitztem Wasserdampf destilliert, da bei der direkten Destillation unter Atmosphärendruck eine teilweise Zersetzung und gleichzeitig eine Verringerung der Zähigkeit erfolgen würde. Bei der Destillation bleiben die schweren, dunklen Harze zurück, und es entstehen hellfarbige Oele, die auf chemischem Wege durch Behandlung mit konzentrierter Schwefelsäure und Natronlauge weiter gereinigt werden. Je nach ihrer Zähigkeit finden diese Schmieröle Verwendung als Spindelöle, Maschinenöle, Dampfzylinderöle usw.

Zum Schmieren von Wagenachsen, z. B. auch bei den Eisenbahnen, verwendet man meist die nicht destillierten, nur mit Schwefelsäure und Natronlauge gereinigten, sehr dunklen Oele. Diese dürfen jedoch nur wenig Paraffin enthalten, da sie sonst der Gefahr der Erstarrung bei tiefer Temperatur ausgesetzt sind. Ebenso müssen auch die zur Schmierung von Eismaschinen verwandten Oele eine Temperatur bis —20° ohne Abscheidung fester Produkte aushalten. Für diese Zwecke kämen fette Oele niemals in Betracht, da sie bei derartigen Temperaturen stets talgartig erstarren würden.

Bestimmungsmethoden der Schmieröle.

Die wichtigsten Bestimmungsmethoden für die Schmieröle, welche ja stets aus Gemischen zahlreicher Kohlenwasserstoffe bestehen, beziehen sich auf die Bestimmung der Zähigkeit, die meist mit dem von Ubbelohde verbesserten Viskosimeter von Engler erfolgt, die Bestimmung des Flammpunktes und Brennpunktes, des Gehaltes an freien Säuren, an verseifbaren Zumischungen und an fremden, unverseifbaren Oelen, wie Harzöle und Steinkohlenteeröle. Unter dem Flammpunkte eines Oeles versteht man die Temperatur, bei der das Oel solche Mengen brennbarer Dämpfe entwickelt, daß sie mit Luft gemischt bei Annäherung einer Flamme explodieren. Durch die Bestimmung des Flammpunktes erhält man einen gewissen Maßstab für die Verdampfbarkeit des Oeles. Ein Oel ist um so brauchbarer, je schwerer es verdampfbar ist. Enthält es leichter verdampfbare Bestandteile, so ändert sich seine Zusammensetzung während des Gebrauches, und außerdem können die Oeldämpfe in Maschinenräumen höchst lästig und feuergefährlich werden. Die Flammpunkte leichter Maschinenöle sollen nicht unter 145° und die von Dampfzylinderölen nicht unter 220° liegen.

6. Seifen. Die fundamentale Reaktion der Seifenfabrikation ist die „Verseifung" der Fette. Der Verseifungsvorgang besteht darin, daß die Fette bei der Behandlung mit wässerigen Alkalilösungen in den dreiwertigen Alkohol Glycerin und in fettsaure Salze zerfallen. Die Fette vermögen sich in der Lauge nur in sehr geringer Menge zu lösen, so daß ein heterogenes System aus einer Fettschicht und aus einer wässerigen Lösung im Anfange des Prozesses vorliegt. Obwohl nun die Löslichkeit der Fette im Wasser so verschwindend klein ist, muß man doch annehmen, daß eine Lösung erfolgt und daß die Einwirkung des Alkalis auf das Fett nur in dieser homogenen Lösung stattfindet. Die Geschwindigkeit, mit welcher ein Fett unter diesen Umständen verseift wird, setzt sich dann aus zwei Teilen zusammen: erstens aus der Schnelligkeit der Auflösung des Fettes in des wässerigen Phase und zweitens aus der Verseifungsgeschwindigkeit des gelösten Fettes in der homogenen Lösung.

Das Wesentliche bei der Verseifung der Fette ist die Spaltung des Fettmoleküls unter Aufnahme von Wasser in einen Alkohol und in Säuren bezw. in fettsaure Salze. Diese hydrolytische Zersetzung erfolgt durch Wasser allein bei niedrigen Temperaturen und Drucken nur in unbedeutendem Maße, wird aber bei Anwendung höherer Temperaturen erheblich vermehrt. Will man die Hydrolyse der Fette allein durch Wasser bewirken, so muß man auch unter erhöhtem Druck arbeiten. Sehr erleichtert wird die Hydrolyse aber durch Anwesenheit einiger katalytisch wirkender Stoffe, von denen neben den Alkalihydroxyden und Karbonaten auch andere Basen sowie Säuren und einige Enzyme tierischen und pflanzlichen Ursprungs hervorzuheben sind.

Man bezeichnet mit dem Namen der Verseifung gegenwärtig nicht nur die alkalische Fettspaltung, sondern jede irgendwie bewirkte Hydrolyse von Verbindungen, welche wie die Fette durch Kondensation von Alkoholen mit Säuren entstanden sind. Während aber der kinetische Verlauf der Hydrolyse der einfachen Ester seit langer Zeit bekannt ist, ist die Verseifung der Fette erst in den letzten Jahren genauer untersucht worden, was sich dadurch erklärt, daß die Fette mit dem Wasser und den wässerigen Lösungen wegen ihrer Schwerlöslichkeit ein heterogenes System bilden, dessen Untersuchung bedeutend grössere Schwierigkeiten verursachte.

Das Ergebnis der neueren Arbeiten über die Verseifung von Fetten in alkoholischen Lösungen, sowie bei den wasserlöslichen Fetthomologen, z. B. den Glycerinestern der Essigsäure ist die Feststellung der Tatsache, daß die Fettmoleküle bei der Ver-

Digitized by Google

seifung nicht momentan in Glycerin und Fettsäure bezw. fettsaure Salze zerfallen; es treten vielmehr Zwischenprodukte auf, indem der Glycerintriester unter sukzessiver Abspaltung je eines Moleküls Fettsäure zuerst einen Diester und dann einen Monoester liefert, der schließlich in freies Glycerin übergeht. Die Fettverseifung durchläuft also mehrere Stufen, aber jede Stufe für sich stellt die Verseifung eines einfachen Esters dar. Es bildet demnach die Theorie der Hydrolyse der einfachsten Ester in homogener Lösung auch die Grundlage für die Erkenntnis der homogenen und heterogenen Fettverseifung.

Von den einzelnen Fettsäuren, welche in den zahlreichen Fetten und Oelen enthalten sind, kommen als Seifenbildner alle diejenigen in Betracht, welche mindestens 8 Kohlenstoffatome im Molekül enthalten. Die Alkalisalze der niederen Fettsäuren weisen nämlich nicht jene für die Seifen charakteristischen Eigenschaften, vor allem die Waschwirkung und den kolloidalen Charakter, auf.

Die im täglichen Leben mit dem Worte „Seife" bezeichneten Stoffe stellen jedoch keine definierten chemischen Verbindungen dar. Die Seifen im technischen Sinne sind vielmehr als kompliziert zusammengesetzte Adsorptionsverbindungen der fettsauren Alkalisalze mit Wasser und verschiedenen Salzen aufzufassen. Man unterscheidet bei den Seifen vielfach die Kali- und Natronseifen oder die weichen bezw. Schmierseifen und die harten Seifen. Diese Einteilung entspricht aber nur bis zu einem gewissen Grade den Tatsachen, da auch feste Kaliseifen bekannt sind.

Zur Herstellung von Seifen aus Fetten benutzt man entweder Kalilauge oder Natronlauge, zu denen in neuerer Zeit noch die Karbonate beider Alkalimetalle getreten sind. Diese finden aber vor allem dann Verwendung, wenn die Fette vorher bereits der Spaltung in Fettsäuren und Glycerin unterworfen worden sind. Die wichtigsten Methoden, nach denen die Fette in Fettsäuren und Glycerin gespalten werden, sind im folgenden, ihrer technischen Wichtigkeit für die Seifenfabrikation entsprechend, im Prinzip aufgeführt:

1. Fettspaltung im Autoklaven.

Während sich Fette beim Erhitzen unter Druck mit Wasser allein erst bei so hohen Temperaturen (über 200°) spalten lassen, daß hierbei gleichzeitig ein großer Teil der organischen Substanz zerstört wird, vollzieht sich die Spaltung in Gegenwart kleiner Mengen von Kalk, Magnesia oder Zinkoxyd schon bei Temperaturen von 150 bis 160°. Man arbeitet meist mit dem letzteren Oxyd und fügt der Fett-Wasseremulsion meist etwa ½ % Zinkoxyd und ebensoviel Zinkstaub zu. Die Spaltung geht dann bei 6 Atm. Druck in etwa 8 Stunden vor sich. Hierauf werden die Fettsäuren von dem spezifisch schwereren Glycerinwasser getrennt, mit Schwefelsäure zur Zersetzung der vorhandenen Zinkseife versetzt, mit Wasser gewaschen und entweder direkt auf Seifen unter Verwendung von Alkalikarbonaten verarbeitet, oder erst einer Destillation unterworfen, die im Vakuum oder mit überhitztem Wasserdampf vorgenommen werden muß.

2. Fettspaltung nach Twitchell.

Dieses Verfahren beruht auf der Tatsache, daß eine Behandlung der Fette mit Schwefelsäure bei 100° Sulfosäuren der ungesättigten Fettsäuren liefert. Entfernt man dann die Schwefelsäure, welche bei längerer Einwirkung die Fette zum Teil verkohlen würde, und kocht mit Wasser bei gewöhnlichem Druck, so bewirken die Sulfosäuren katalytisch eine fast vollständige Verseifung der Fette. Als Nachteil dieses Verfahrens muß jedoch hervorgehoben werden, daß eine starke Bräunung der Fette durch die anfangs zugegebene konzentrierte Schwefelsäure stattfindet und daß die aus den unbeständigen Sulfofettsäuren allmählich beim Kochen abgespaltene Schwefelsäure einen großen Teil des gebildeten Glycerins zerstört. Um diese Uebelstände zu vermeiden, hat Twitchell nicht die Schwefelsäure als solche den Fetten zugesetzt, sondern vorher eine geeignete Sulfosäure besonders hergestellt. In seinem „Reaktiv" benutzt er eine viel beständigere Sulfofettsäure, wie sie z. B. durch Vereinigung von Benzol, Oelsäure und Schwefelsäure entsteht. Je nach der Art der Fette setzt er dann ein Drittel bis 3 % seines Reagenses zu und läßt die Masse ununterbrochen 12 bis 24 Stunden sieden. Auf diese Weise werden 90 bis 95 % der Fette gespalten und gleichzeitig ein Glycerinwasser erhalten, das weiter verarbeitet werden kann.

3. Fettspaltung durch Fermente.

Die fermentative oder enzymatische Spaltung, welche für die Zwecke der Technik von Connstein, Hoyer und Wartenberg ausgearbeitet wurde, beruht auf der von Green und Siegmund gemachten Beobachtung, daß beim Zusammenreiben ölhaltiger Pflanzensamen mit Wasser durch Fermentwirkung freie Fettsäuren entstehen. Technisch verwendet man nur das Enzym des Ricinussamens, welcher mit Wasser zermahlen wird und der Gärung überlassen wird. Es scheidet sich dann ein das Ferment enthaltender dicker Rahm oben ab, welcher von der sauren Unterlauge getrennt werden kann. Bei der Herstellung von Fettsäuren

Digitized by Google

gibt man 4 bis 10 % des Fermentes zu der mit 30 bis 40 % Wasser angesetzten Fettemulsion und erwärmt auf etwa 35°. Als „Aktivator" gibt man dann noch meist 0,15 bis 0,2 % vom Fettgewicht an Mangansulfat hinzu. Nach 48 Stunden erhält man meist eine Spaltung von 90 % freier Fettsäure, worauf man mit indirektem Dampf auf ca. 80° erwärmt und etwas verdünnte Schwefelsäure zugibt. Durch Zugabe der letzteren Säure wird eine Trennung der Emulsion bewirkt in eine untere wässerige Glycerinschicht, eine obere Fettsäureschicht und eine sogenannte Mittelschicht, auf deren tunlichste Verminderung man mit Erfolg hingestrebt hat. Sie beträgt heute bei Anwendung der Emulsion auch nur noch 2 bis 3 %.

4. Das Krebitz-Verfahren.

Dieses Verfahren beruht auf der Umsetzung von Kalkseife mit kohlensaurem Alkali. Zur Herstellung einer geeigneten Kalkseife nach D.R.P. 155108 wird das auf etwa 100° erwärmte Neutralfett mit der äquivalenten Menge aus reinem Kalk hergestellter Kalkmilch innig gemischt. Hierbei bildet sich eine dicke Emulsion, die man der Ruhe überläßt. Es entsteht eine feste, jedoch leicht zerreibliche Kalkseife, welche gemahlen und ausgewaschen wird, um das Glycerin zu entfernen, und dann mit Alkalikarbonat in der Siedehitze umgesetzt wird. Der durch doppelte Umsetzung entstehende kohlensaure Kalk setzt sich dann zu Boden und läßt sich ohne weiteres von der Unterlauge und der oben befindlichen fertigen Seife trennen.

Die Verseifung der Neutralfette muß dagegen mit Aetzlaugen erfolgen, und zwar je nach der Natur des Fettes mit verdünnterer oder mit starker Lauge. So erfordert z. B. der Talg eine verhältnismäßig dünne Alkalilösung von 8 bis 10° Baumé, während sich Kokosöl und Palmkernöl nur mit konzentrierten Laugen verseifen lassen. Die Verseifung wird dabei gewöhnlich in der Siedehitze vorgenommen und die Erwärmung mittels direkten Feuers oder besser mittels Dampf bewirkt. Wesentliche Vorbedingung für den Eintritt der Verseifung ist eine innige Emulsion zwischen der Lauge und dem Fett. Um dies zu erreichen, wird zunächst mit dünnen, ca. 10 % starken Laugen „vorgesotten", worauf man allmählich stärkere Lauge von ca. 35° Baumé zufügt, bis „Verband" eingetreten ist. Man versteht hierunter den Uebergang der noch teilweise getrennten Fett-Seife-Laugenmasse zu einem homogenen Seifenleim. In diesem Augenblick ist die Verseifung soweit fortgeschritten, daß die gegenseitige Lösung der Massen möglich ist, und dieser Zeitpunkt macht sich oft dadurch erkenntlich, daß nunmehr der weitere Verseifungsprozeß mit solcher Heftigkeit unter Entwickelung von Wärme bezw. Dampf erfolgt, daß die Masse sehr hoch steigt und aus dem Kessel läuft, wenn nicht für einen genügenden Steigeraum gesorgt ist.

Die Verseifung der Fettsäuren erfolgt aus ökonomischen Ursachen meistens mittels Soda und beruht chemisch auf der Verdrängung der Kohlensäure durch die etwas stärkere Fettsäure. Auch hierbei wird in der Siedehitze gearbeitet, indem man die Fettsäure langsam in die siedende Sodalösung einlaufen läßt. Die Verseifung des nicht gespaltenen Fettes muß jedoch auch in diesem Falle mittels Aetzlaugen erfolgen. Man arbeitet stets mit einem sehr geringen Ueberschuß an freiem Alkalihydroxyd, um eine möglichst neutrale Seife zu erhalten.

Neben der Verseifung auf warmem Wege spielt jedoch auch die sogenannte kalte Verseifung eine gewisse Rolle. Sie beruht auf der Fettverseifung im Zustand feinster Emulsion, wobei die Fette und Oele die Gestalt von kleinsten Kügelchen annehmen und der Lauge infolgedessen eine große Angriffsfläche bieten. Man benutzt diese Verseifungsmethode vornehmlich zur Erzeugung der sogenannten kaltgerührten Toiletteseifen, die leider vielfach stark gefüllt werden, im Gegensatz zu einer nach den Regeln hergestellten Kernseife, die einen Gehalt von durchschnittlich 65 % Fettsäure haben soll.

Je nach der Art der Seife, welche man herstellen will, ist der Fettansatz ein verschiedener. Man unterscheidet dabei zwei Gruppen von Fetten, und zwar: 1. die an festen Fettsäuren reicheren Fette, wie Talg, Knochenfett, Palmkernöl, Palmöl, Kokosöl und andere, welche vornehmlich zur Herstellung der Natronseifen dienen, und 2. die an Oelsäure und anderen flüssigen Fettsäuren reichen Oele, wie Leinöl, Sesamöl, Kottonöl, Bohnenöl usw., welche hauptsächlich zur Schmierseifenfabrikation verwendet werden. In der Praxis benutzt man dabei niemals ein einzelnes Fett zur Seifengewinnung, sondern durchweg Gemische verschiedener Fette und Oele.

Der nach der Verseifung der Fette im Siedekessel befindliche Seifenleim stellt eine kolloidale Seifenlösung in einem alkalihaltigen Lösungsmittel dar, aus welchem durch Zusatz von Elektrolyten die Seife zur Abscheidung gebracht werden kann. Da zu diesem Zwecke hauptsächlich das Kochsalz benutzt wird, so bezeichnet man diesen Vorgang von jeher als Aussalzen. Rührt man nämlich in den siedenden Seifen-

Digitized by Google

leim solange festes Kochsalz ein, bis eine vollständige Trennung in zwei Schichten, den obenauf schwimmenden Seifenkern und die wässerige Kochsalz-, Glycerin- und freies Alkali enthaltende Unterlauge eingetreten ist, so erhält man die Kernseife, welche im wesentlichen aus fettsaurem Alkali besteht. Je nach dem Wassergehalt unterscheidet man bei diesen Natronseifen Kernseifen auf Unterlauge, Kernseifen auf Leimniederschlag, Eschweger Seifen und Leimseifen. Die Unterschiede der Seifen liegen bei den fertigen Produkten in dem Fettgehalt bezw. den Ausbeuten, die 100 Teile des Fettansatzes geben. Diese Ausbeute beträgt bei Kernseifen ca. 150 %, bei Eschweger Seifen ca. 200 bis 210 % und bei Leimseifen 250 bis 500 %.

Eine erhöhte Ausbeute erhält man auch durch das sogenannte Schleifen der Kernseifen. Dasselbe besteht in dem Zufügen von Wasser und verdünnter Lauge zur Seife, welche einen Teil dieser Flüssigkeiten aufnimmt und gleichzeitig dadurch dünnflüssiger wird.

Halbkernseifen oder Eschweger Seifen sind wässerige Seifenlösungen, Seifenleime, welchen bei der Siedetemperatur nur soviel Salz zugesetzt wurde, daß bei dieser Temperatur noch keine Abscheidung eintrat. Beim Erkalten zerfällt dagegen auch dieses System in die zwei Phasen: Seifen- und Leimniederschlag.

Leimseifen stellen dagegen erstarrte Lösungen von Seifen in salzhaltigen Medien dar. Das Existenzgebiet dieser Seifen findet nur eine Grenze in der Stabilität der fettsauren Salze, da bei zu hohem Salzzusatz schließlich eine Aussalzung eintreten muß. Die Ausbeute an Seife schwankt bei diesem Produkt daher in den weitesten Grenzen, 250 bis 1000 und mehr Prozent.

Die Leimseifen, welche erheblich geringwertiger sind als die Kernseifen, schließen, wie aus ihrer Darstellung ersichtlich, alle Verunreinigungen, Unterlauge, Glycerin, Salze usw. in sich ein.

Die Herstellung der verschiedenen im Handel vorkommenden weichen Seifen oder Schmierseifen, welche unter Verwendung von Kalilauge erzeugt werden, entspricht vollkommen der Herstellung der Natronseife. Ein Unterschied besteht jedoch in bezug auf das benutzte Fettmaterial und in der Verwendung von Kalilauge allein oder in Gemengen mit Natronlauge.

Neben den Seifen haben seit einer Reihe von Jahren Seifenpulver oder Waschpulver, d. h. Gemenge von Seifen mit Soda und neuerdings vielfach mit Bleichmitteln, wie Superoxyden und vor allem Perborat, Anwendung gefunden. Viel benutzt wird auch als Zusatz zur Seife das Natronwasserglas.

Einen besonderen Zweig der Seifenfabrikation bildet ferner die Fabrikation der Toiletteseifen, welche meist von der Erzeugung von Haushaltseifen getrennt, in besonderen Fabriken ausgeübt wird. Man unterscheidet vornehmlich drei Arten von Toiletteseifen: die sogenannten pilierten Seifen, die Transparentseifen und die Kokosseifen. Der Hauptwert der besseren Seifen liegt übrigens meist nicht in den Seifen selbst, sondern in den zugesetzten Parfüms.

Am wichtigsten sind die pilierten Seifen, welche aus Kernseifen hergestellt werden. Zu diesem Zwecke wird die Kernseife, die nur aus den besten Rohmaterialien, meist Rindertalg neben geringen Mengen Kokosöl und anderen reinen Oelen, hergestellt sein darf, in feine Späne gehobelt. Diese Späne werden bis auf 6 bis 8 % Wasser entwässert, gefärbt und parfümiert, dann in besonderen Maschinen gleichmäßig durchgeknetet und in der sogenannten Piliermaschine zu einem festen Strange gepreßt, aus dem dann in Formenpressen die einzelnen Stücke hergestellt werden.

Ueber die Wirkung der Seife als Reinigungsmittel sind zahlreiche Theorien aufgestellt worden, welche die Wirkung teils auf chemischem, teils auf physikalischem Gebiet zu erklären suchen. Vielfach nahm man an, daß die reinigende Wirkung der Seifen vor allem dem bei der Berührung mit Wasser entstandenen hydrolytisch abgespaltenen Alkalihydroxyd zuzuschreiben sei, welches den fettigen Schmutz der mit Seife behandelten Objekte fortnehme, während der Schaum durch Einhüllen dazu beitrage, ihn mechanisch zu entfernen. Der Glaube an die schmutzlösende bezw. fettverseifende Wirkung des hydrolytisch abgespaltenen Alkalihydroxyds ist jedoch neuerdings recht in Mißkredit gekommen. In Anbetracht der ziemlich geringen Geschwindigkeit des Verseifungsprozesses und der recht geringen Konzentration des hydrolytisch abgespaltenen Alkalis ist jedenfalls an eine Verseifung von Neutralfett gar nicht zu denken, und ebensowenig kann man das „Lösungsvermögen" der Seife für die Waschwirkung ohne weiteres in Anspruch nehmen. So hat R. Hirsch nachgewiesen, daß ein größeres Lösungsvermögen von Seifenlösungen für Neutralfette nicht bestehe, obschon andere Stoffe, wie Benzol, Terpentinöl und ätherische Oele sich in der Seifenlösung auflösen. Von Hirsch wurde auch gezeigt, daß man mit 10 ccm 5 prozentiger Seifenlösung, d. h. der für die Handwaschung unter gewöhnlichen Umständen üblichen Menge, 1 ccm auf den Handflächen verriebenes Kokosöl entfernen kann, obwohl die Menge Seifen-

Digitized by Google

lösung noch nicht den hundertsten Teil dieser Oelmenge aufzulösen vermag. Hirsch schließt daher, daß die Hauptrolle bei der Waschwirkung das Emulsionsvermögen bilde. Die neueren Untersuchungen über das Waschvermögen der Seifenlösungen gehen nicht von chemischen, sondern von physikalischen Wirkungen aus und betonen vor allem die Bedeutung der Oberflächenkräfte.

Besonders ausführliche Untersuchungen über den Waschprozeß auf Grundlage der kolloidchemischen Auffassung der Seifen hat W. Spring angestellt. Nach ihm beruht die Waschwirkung auf der Bildung einer Adsorptionsverbindung mit dem wegzuwaschenden Stoff, einer Verbindung, die jedes Adhäsionsvermögen verloren hat, welches ihre Komponenten noch vor der Vereinigung besaßen.

Daß die Lösungen von Seifen in Wasser kolloidalen Charakter haben, wird jetzt allgemein angenommen. Einen interessanten Versuch, die Prozesse der Seifenfabrikation vom Standpunkt der Phasenlehre aus zu behandeln, hat Merklen in seinem Buch über die Kernseifen gemacht. Die Zulässigkeit dieser Betrachtungsweise erscheint jedoch zweifelhaft, da dieselbe zur Voraussetzung hat, daß die Seife sich in wahrer Lösung befindet, so daß ihre aktive Masse der analytisch feststellbaren Konzentration entspricht, während gerade der kolloide Charakter der Seife, auf den Merklen selbst den größten Teil seiner eigentlichen technischen Betrachtungen aufbaut, zu dem Schlusse führt, daß die Homogenität der Seifenlösung nur eine makroskopische ist und daß vielmehr tatsächlich mikroheterogene Gebilde vorliegen. Immerhin haben die Ausführungen von Merklen und neueren Betrachtungsweisen der Seifen von Goldschmidt und Leimdörfer den Weg gewiesen, auf dem die Industrie von dem bisherigen Zustand des Empirismus zur wissenschaftlichen Durchbildung der Seifenfabrikation wird später gelangen können.

Literatur. Zu 2a: **G. Borneman,** *Die fetten Oele des Pflanzen- und Tierreichs. Weimar 1889.* — **C. Schädler,** *Technologie der Fette und Oele. 2. Aufl. Berlin 1892.* — **J. Lewkowitsch,** *Technologie und Analyse der Oele, Fette und Wachse. Braunschweig 1905.* — **G. Hefter,** *Technologie der Fette und Oele. 3 Bände. Berlin 1906.* — **R. Benedikt und F. Ulzer,** *Analyse der Fette und Wachsarten. 5. Aufl. Berlin 1910.* — **C. Stiepel,** *Fette, Oele, Wachse. Leipzig 1911.* — **L. Ubbelohde,** *Handbuch der Chemie, Analyse und Technologie der Oele und Fette. 3 Bände. Leipzig 1908.* — **F. Erban,** *Die Anwendung von Fettstoffen in der Textilindustrie. Halle 1912.* — **J. Marcussohn,** *Laboratoriumsbuch für die Industrie der Fette und Oele. Halle 1911.*

Zu 2b: **J. Seligmann und E. Zieke,** *Handbuch der Lack- und Firnisindustrie. Berlin 1910.*

Zu 3: **F. W. Semmler,** *Die ätherischen Oele nach ihren Bestandteilen, unter Berücksichtigung der geschichtlichen Entwickelung. Leipzig 1905 bis 1907.* — **E. Gildemeister und F. Hoffmann,** *Die ätherischen Oele. Berlin 1899. 2. Aufl. 1910. Halbjahrsberichte der Firma Schimmel & Co. in Miltitz bei Leipzig.* — **A. Hesse,** *Ueber die Entwickelung der ätherischen Oele in Deutschland in den letzten 25 Jahren. In der Festschrift für Otto Wallach. Göttingen 1909.* — **C. von Rechenberg,** *Theorie der Gewinnung und Trennung der ätherischen Oele durch Destillation. Leipzig-Miltitz 1910.* — **F. Rochussen,** *Aetherische Oele und Riechstoffe. Sammlung Göschen. Leipzig 1909.* — **A. Hesse,** *Bilder aus der Riechstoffindustrie. Zeitschrift für angewandte Chemie. 1912. S. 337 bis 365.* — **R. Leimbach,** *Die ätherischen Oele. Halle 1910.*

Zu 4 und 5: **A. Volland,** *Die Fabrikation der Schmiermittel. Norrköping 1902.* — **D. Holde,** *Untersuchung der Mineralöle und Fette. 3. Aufl. Berlin 1909.*

Zu 6: *Handbücher der Seifenfabrikation:* **Wittner.** *6. Aufl. Wien 1906.* — **Fischer.** *8. Aufl. Leipzig 1904.* — **Engelhardt.** *2. Aufl. 3. Bd. Wien 1896.* — **C. Deite.** *3. Aufl. Berlin 1903 bis 1906.* — **E. Marazza,** *L'industria saponiera. 2. Aufl. Mailand 1907.* — **L. Ubbelohde,** *Handbuch der Oele und Fette. Bd. 3. Seifenfabrikation. Leipzig 1911.* — **F. Merklen,** *Die Kernseifen. Halle 1907.*

H. Grossmann.

Feuchtigkeit.

1. Der atmosphärische Wasserdampf. 2. Absolute Luftfeuchtigkeit. Sättigung. Taupunkt. Relative Luftfeuchtigkeit. 3. Zeitliche und räumliche Verteilung der Luftfeuchtigkeit. 4. Nächtliches Temperaturminimum. 5. Nebel, Staub und Ionen als Kondensationskerne. 6. Fallwinde, Föhn. 7. Hygrometer und Psychrometer.

1. Der atmosphärische Wasserdampf. Während die in der Atmosphäre vorhandenen Mengen von Stickstoff, Sauerstoff usw. keinen merklichen Aenderungen unterworfen sind, treten Kohlensäure und Wasserdampf in stetig wechselnden Beträgen auf. Wie die Kohlensäure durch mancherlei an der unteren Grenze des Luftmeeres stattfindende Vorgänge vermehrt oder vermindert wird, wurde in dem Artikel „Atmosphäre" (Bd. I S. 573) gezeigt. Die Feuchtigkeit der Luft, d. h. der ihr beigemengte gasförmige Wasserdampf, erleidet Aenderungen, die nicht bloß in den untersten Luftschichten, sondern in der ganzen „Wolkenzone" verlaufen, also bis zu beträchtlichen Höhen der Atmosphäre

Digitized by Google

reichen. Diese Aenderungen bestehen in Verdampfen und Kondensieren, im Wechsel zwischen flüssigem und gasförmigem Aggregatzustand, und sie bewirken eine Verteilung des Wasserdampfes in den verschiedenen Luftschichten, welche völlig verschieden von derjenigen ist, die sich bei gleichbleibender Dampfmenge und ohne Luftbewegungen, welche die Schichten mischen, einstellen würde. Wollte man aus dem am Boden gemessenen Dampfdruck und unter Voraussetzung einer ruhenden unveränderlichen Dampfatmosphäre die ganze, in der Luft befindliche Dampfmenge berechnen, so würde man etwa 5 bis 6 mal so viel Feuchtigkeit finden, als in Wirklichkeit gemäß den auf Bergen und bei Luftfahrten gewonnenen Beobachtungen vorhanden ist. Durch die steten Aenderungen des Aggregatzustandes und durch die Luftbewegungen wird die Feuchtigkeit in den bodennahen Schichten zusammengedrängt, und ihre Menge nimmt nach oben hin viel rascher ab, als es im Gleichgewichtszustande zuträfe.

2. Absolute und relative Luftfeuchtigkeit. Sättigung. Taupunkt. Den in einem Raume herrschenden Feuchtigkeitszustand bezeichnet man entweder durch Angabe der wirklich vorhandenen Dampfmenge oder durch Vergleichung des augenblicklichen Zustandes mit demjenigen der Sättigung. Im ersteren Falle wird die absolute, im letzteren die relative Luftfeuchtigkeit angegeben. Als absolute Luftfeuchtigkeit oder Dampfdruck bezeichnet man den in Millimetern Quecksilberhöhe gemessenen Druck, welchen der Wasserdampf ausübt; es ist dies also derjenige Anteil am Barometerstand, welcher dem am Beobachtungsorte der Luft beigemengten Wasserdampf entspricht, wenn man den am Barometer abgelesenen Gesamtdruck als Summe der von allen einzelnen Luftbestandteilen ausgeübten Einzeldrucke ansieht. Die Zahl, welche den Dampfdruck in Millimetern Quecksilber mißt, gibt beinahe zugleich auch an, wieviel Gramm Wasserdampf in 1 Kubikmeter enthalten sind. Verwandte und gleichfalls die absolute Luftfeuchtigkeit enthaltende Bezeichnungen sind: spezifische Feuchtigkeit, nämlich Zahl der Gramme Wasserdampf, die in einem Kilogramm feuchter Luft enthalten sind, und Mischungsverhältnis, d. i. die Zahl der Gramme Wasserdampf, welche einem Kilogramm trockener Luft beigemengt sind.

Im Einzelfall kann die absolute Feuchtigkeit einen bestimmten Betrag nicht überschreiten, der von der jeweiligen Temperatur abhängt und mit ihr steigt. Ist die größte Dampfmenge, welche bei der herrschenden Temperatur möglich ist, in einem Raum vorhanden, so nennen wir diesen Dampf gesättigt, und ebenso spricht man von gesättigter Luft, wenn ihr gesättigter Dampf beigemengt ist. Ist in einem geschlossenen Raum eine Eis- oder Wassermenge vorhanden, so erfüllt sie durch Verdampfen den ganzen Raum bis zur Sättigung mit Wasserdampf. In der nachfolgenden Tabelle sind für die einzelnen Temperaturen die zugehörigen Sättigungsdrucke angegeben, nämlich die

Sättigungsdruck des Wasserdampfes.
Nach Scheel und Hense.
Ann. d. Physik (4) 29, 723; 1909 und 31, 715; 1910

Grad	mm	Grad	mm	Grad	mm
—30	0,28	0	4,58	16	13,64
—25	0,47	1	4,93	17	14,53
—20	0,77	2	5,29	18	15,48
—15	1,24	3	5,68	19	16,48
—14	1,36	4	6,10	20	17,54
—13	1,49	5	6,54	21	18,66
—12	1,63	6	7,01	22	19,83
—11	1,78	7	7,51	23	21,07
—10	1,95	8	8,05	24	22,38
— 9	2,13	9	8,61	25	23,76
— 8	2,32	10	9,21	26	25,22
— 7	2,53	11	9,84	27	26,75
— 6	2,76	12	10,52	28	28,36
— 5	3,01	13	11,23	29	30,05
— 4	3,28	14	11,99	30	31,83
— 3	3,57	15	12,79		
— 2	3,88				
— 1	4,22				

höchsten Werte, welche in einem mit Wasser (bei Minustemperaturen mit Eis) in Berührung befindlichen Raume der Dampfdruck annehmen kann. Umgekehrt bedeuten die neben den einzelnen Drucken stehenden Sättigungstemperaturen die Grenze, unter welche die Temperatur nicht sinken kann, ohne daß der Dampfdruck zugleich unter den zugehörigen Wert fällt. Wird ein mit Dampf gesättigter Raum erwärmt, so entfernt er sich vom Sättigungszustande, kann noch mehr Dampf aufnehmen und, wenn verdampfbares Wasser vorhanden ist, wächst die absolute Feuchtigkeit bis zur wieder erreichten Sättigung. Wird derselbe mit Dampf gesättigte Raum abgekühlt, so entsteht Uebersättigung, und in der Regel, nämlich wenn Gelegenheit zur Kondensation vorhanden ist, geht so viel Dampf in flüssige Form über, daß der verbleibende Rest für die veränderte Sättigungsmenge ausreicht. Demgemäß bezeichnet man die Sättigungstemperatur, welche einem bestimmten Dampfdruck entspricht, auch als Taupunkt, nämlich als die Grenze, bis zu welcher die dampfhaltige Luft abgekühlt werden kann, ehe Kondensation eintritt.

Ueberhaupt ist für meteorologische Betrachtungen die Beziehung der Luftfeuchtig-

Digitized by Google

keit zur herrschenden Temperatur so wichtig, daß man neben der absoluten Feuchtigkeit noch eine andere Bezeichnungsweise, welche jener Beziehung Rechnung trägt, verwendet. Es wird nämlich als relative Luftfeuchtigkeit die vorhandene Dampfmenge bezeichnet, wenn sie in Prozenten der zurzeit möglichen Sättigungsmenge ausgedrückt ist. Gesättigte Luft hat also 100 % relative Feuchtigkeit, und eine solche von 75 oder 50 % bedeutet, daß der vorhandene Dampfdruck nur drei Viertel oder die Hälfte desjenigen Betrages ausmacht, der bei der herrschenden Temperatur zur Sättigung gehören würde. Die relative Luftfeuchtigkeit läßt also erkennen, wie weit der vorhandene Feuchtigkeitszustand von der Sättigung entfernt ist, und während die absolute Feuchtigkeit so lange, als die Sättigung nicht erreicht wird, durch bloße Temperaturänderung nicht geändert wird, schwankt die relative Feuchtigkeit mit der Temperatur, und zwar im entgegengesetzten Sinne. Beim Erwärmen entfernt sich die Luft vom Sättigungszustande, beim Abkühlen nähert sie sich ihm, es muß also die relative Feuchtigkeit beim Erwärmen sinken, beim Abkühlen steigen.

Als eine Bezeichnung, die der relativen Feuchtigkeit ähnlich ist, sei noch das Sättigungsdefizit erwähnt; so nennt man den Betrag, um welchen der vorhandene Dampfdruck hinter dem Sättigungsdruck (für die herrschende Temperatur) zurückbleibt, also den Unterschied zwischen Sättigungsdruck und absoluter Luftfeuchtigkeit.

Würde die ganze in der Luft vorhandene Dampfmenge in flüssige Form übergeführt und die Lufttemperatur durch die hierbei frei werdende, vorher gebundene Wärme erhöht, so entstünde die ergänzte oder äquivalente Temperatur, welche gleichfalls für den Feuchtigkeitszustand der Luft charakteristisch sein kann. Zur völligen Bezeichnung des Zustandes reicht freilich diese Größe nicht aus, weil die beiden Werte, auf denen sie beruht, Temperatur und Dampfdruck, sich unabhängig voneinander ändern, und eine äquivalente Temperatur auf sehr verschiedenen Wertepaaren jener beiden Größen beruhen kann.

3. Zeitliche und räumliche Verteilung der Luftfeuchtigkeit. Die zeitlichen Aenderungen der Luftfeuchtigkeit stehen in naher Beziehung zu denjenigen der Temperatur. Die absolute Feuchtigkeit zeigt im jährlichen wie im täglichen Gang Schwankungen, die sehr nahe mit den gleichzeitigen Temperaturschwankungen (Bd. I, S. 583 u. 588) zusammenfallen, weil die Steigerung der Temperatur gewöhnlich eine erhöhte Verdampfung, Sinken der Temperatur dagegen teilweise Kondensation des atmosphärischen Wasserdampfes erzeugt. Nur in Binnengegenden mit starker Tagesschwankung der Temperatur pflegt zur wärmsten Tageszeit ein vorübergehendes Sinken des Dampfdrucks einzutreten, wahrscheinlich veranlaßt durch den von der Mittagshitze erzeugten aufsteigenden Luftstrom, der den Wasserdampf der unteren Schichten emporführt. Die relative Luftfeuchtigkeit wird von der Temperatur in doppelter Weise beeinflußt, einmal in der vorerwähnten Art, indem mit der Temperatur auch der Sättigungsdruck schwankt, und dann durch die Aenderungen des Dampfdruckes. Die erstere Einwirkung überwiegt an den in der Ebene und in Tälern gelegenen Orten, so daß dort überall der jährliche und tägliche Gang der relativen Feuchtigkeit nahezu die entgegengesetzten Aenderungen zeigt, wie der Temperaturgang. Auf Bergen dagegen und auch in den entsprechenden Höhen der freien Atmosphäre gleicht der Jahres- und Tagesgang der relativen Feuchtigkeit demjenigen der Temperatur, vielleicht, weil auf- und absteigende Ströme ihre Wirkung in diesem Sinne üben.

Die räumliche Verteilung der Luftfeuchtigkeit hängt gleichfalls von der Temperatur und außerdem von dem Vorhandensein verdampfbaren Wassers ab. Demnach finden wir in den Tropen die höchsten Beträge der absoluten Feuchtigkeit, und im übrigen größere Werte über den Meeren und an den Küsten, kleinere im Binnenlande. Die relative Feuchtigkeit weist im ganzen entgegengesetzte Verteilung auf wie die Temperatur. Merkwürdig ist die Einwirkung großer Städte auf die Feuchtigkeit, wie sie Kremser (Meteorol. Zeitschr. **25**, 206, 1908) an Berliner, Breslauer u. a. Beobachtungen nachwies. Die absolute wie die relative Feuchtigkeit zeigten in der Stadt kleinere Werte, als nahe dabei auf dem Lande, und der Unterschied war im Durchschnitt wie im jährlichen und täglichen Gang um so größer, je höher die Temperatur lag. Zur Erklärung wird erwähnt, daß der von den Häusern oder auch von Steinpflaster und Asphalt bedeckte und durch Kanalisation entwässerte städtische Boden sehr viel weniger Niederschlagswasser aufnimmt, als der mit Pflanzenwuchs bedeckte ländliche Boden, und daß demgemäß in der Stadt weniger Wasser verdampft. Wie die Gesamtmenge des atmosphärischen Wasserdampfes zur warmen Zeit überall größer ist, muß dasselbe auch für das Ueberwiegen der ländlichen über die städtische Luftfeuchtigkeit zutreffen.

Nach oben hin nehmen in der Atmosphäre sowohl absolute wie relative Feuchtigkeit ab, jedoch nicht eben regelmäßig, sondern

Digitized by Google

nach Schichten geordnet, die namentlich in betreff der relativen Feuchtigkeit Unstetigkeiten zeigen. Aus Berliner Luftfahrten sind für die verschiedenen Höhen und nach Jahreszeiten gesondert Mittelwerte der Feuchtigkeit berechnet, die in der folgenden Tabelle wiedergegeben werden; sie zeigen bei etwa 3000 m Höhe Unregelmäßigkeiten, welche auch bei der diesen Zahlen zugrunde liegenden Mittelbildung nicht verschwinden.

Mittelwerte der absoluten Luftfeuchtigkeit über Berlin (Gramm im Kubikmeter). Nach Schubert, 21. Jahresbericht des Berliner Zweigvereins der Deutschen Meteorologischen Gesellschaft 1904.

Höhe	Winter	Frühling	Sommer	Herbst	Jahr
20	4,31	5,89	10,23	7,23	6,92
500	3,52	4,85	8,46	5,78	5,65
1000	2,87	3,93	6,95	4,68	4,61
1500	2,33	3,16	5,70	3,79	3,74
2000	1,89	2,25	4,60	3,08	3,03
2500	1,51	2,05	3,71	2,51	2,44
3000	1,21	1,64	2,98	2,04	1,97
4000	0,76	1,05	1,90	1,33	1,26
5000	0,46	0,69	1,16	0,84	0,79
6000	0,26	0,41	0,68	0,49	0,46
7000	0,14	0,21	0,34	0,25	0,24
8000	0,06	0,08	0,14	0,10	0,10
9000	0,01	0,02	0,03	0,02	0,02

Mittelwerte der relativen Luftfeuchtigkeit über Berlin (in Prozenten). Nach Süring, Wissenschaftliche Luftfahrten **3**, 166, 1900.

Höhe in m	Frühling	Sommer	Herbst	Winter
Erdboden	75,1	70,1	80,8	82,6
500	71,6	69,5	71,4	72,6
1000	69,3	77,3	75,6	58,0
1500	58,8	70,9	69,7	49,9
2000	57,9	69,6	52,8	46,8
2500	62,5	64,8	55,0	49,3
3000	61,1	55,6	50,7	49,5
3500	50,1	54,9	49,6	41,0
4000	57,2	64,2	49,2	40,5
4500	67,6	56,7	51,8	39,0
5000	—	—	56,9	—

Der Taupunkt muß, da der Dampfdruck nach oben kleiner wird, gleichfalls nach oben hin sinken. Nach Schubert (Meteorol. Zeitschr. **26**, 390, 1909) sinkt im Gebirge der Taupunkt auf 100 m Erhebung um 0,5°, in der freien Atmosphäre rascher. Bei aufsteigender Luft im Trockenstadium (Bd. I, S. 592) nimmt auf je 100 m die Temperatur um 0,99°, der Taupunkt um 0,17° ab, sodaß der Unterschied beider (Temperatur minus Taupunkt) dabei um 0,82° kleiner wird. Danach kann man aus Temperatur und Feuchtigkeit der unteren Luft die Höhe berechnen, in welcher beim Aufsteigen der Taupunkt erreicht wird und Kondensation und Wolkenbildung beginnen. Im Vergleich zum Gebirge sinkt in der freien Atmosphäre die Temperatur nach oben hin langsamer, der Taupunkt, wie erwähnt, rascher; die Differenz beider ist also im Gebirge kleiner und hat dort solche Werte, als wäre die Gebirgsluft aus niedrigeren Schichten der freien Atmosphäre im aufsteigenden Strom emporgeführt. Die Rechnung ergibt, daß die Temperatur und Feuchtigkeit der in 1000 resp. 2000 m Höhe im Gebirge befindlichen Luft einem vorausgegangenen Aufsteigen an den Berghängen um 130 resp. 360 m entsprechen.

4. Das nächtliche Temperaturminimum. Eine praktische Anwendung der Feuchtigkeitsmessungen beruht auf ihrer Beziehung zum nächtlichen Temperaturminimum. Wenn nämlich bei abendlicher oder nächtlicher Abkühlung der Taupunkt erreicht und dann der Luft noch mehr Wärme entzogen wird, so beginnt Kondensation der nun über die Sättigungsmenge hinaus vorhandenen Feuchtigkeit. Hierbei wird die vorher gebundene Wärme frei und zwar im Betrage von etwa 600 Grammkalorien für je ein Gramm kondensierten Wassers, und dadurch wird der weiteren Abkühlung entgegengewirkt. Die Erfahrung bestätigt, daß die Temperatur nicht merklich unter den Taupunkt zu sinken pflegt. In ruhigen Nächten, wenn die am Beobachtungsorte vorhandene Luft nicht durch Wind fortgeführt wird, kann man den Betrag des am Abend bestimmten Taupunkts als untere Grenze der darauffolgenden nächtlichen Abkühlung ansehen und daraufhin namentlich für die Frage nach etwa bevorstehendem Nachtfrost oft nützliche Antwort finden.

5. Nebel. Staub und Ionen als Kondensationskerne. Beginnt aber die Lufttemperatur dennoch unter den Taupunkt zu sinken, so bildet sich als Ergebnis der Kondensation Nebel. Meistens ist dies die Wirkung starker Abkühlung des Bodens, die durch Ausstrahlung gegen den klaren Himmel entstanden ist und der untersten Luftschicht durch Leitung Wärme entzieht. Dann schreitet die Nebelbildung nach oben hin fort, sofern nämlich die Abkühlung rascher emporsteigt, als die Nebeltröpfchen fallen, und man spricht vom „Steigen des Nebels", während in Wirklichkeit nur die Kälte es ist, welche steigt. Dieser Vorgang pflegt in Hochdruckgebieten mit ihren klaren, ruhigen Nächten einzutreten, und der Boden wird dann gegen weitere Ausstrahlung durch die entstandene Nebelschicht geschützt. Eine andere Bildungsweise des Nebels besteht darin, daß kältere, dampfhaltige Luft über eine wärmere Wasserfläche weht und die

Digitized by Google

Dämpfe nicht aufnehmen kann, welche vom Wasser aufsteigen und einen der höheren Wassertemperatur entsprechenden Druck haben. Dann wird der überschüssige Teil des Dampfes in der Luft kondensiert und bildet Nebel.

Es ist nicht schwer, künstlich und im kleinen die atmosphärische Nebelbildung nachzuahmen. Dazu kann ein mit feuchter Luft gefülltes Glasgefäß dienen, in dem der Luftdruck einer raschen Verringerung ausgesetzt wird, z. B. indem man in das im übrigen verschlossene Gefäß durch ein den Stopfen durchsetzendes Rohr einen Luftstrom mit kräftigem Druck einbläst, dann kurze Zeit die Temperatur sich ausgleichen läßt und hierauf die Oeffnung freimacht, so daß der innere Druck wieder auf den Betrag des äußeren sinkt. Hierbei sieht man in der Regel den Innenraum des Gefäßes sich mit Nebel erfüllen, der langsam herabsinkt und bei erneuter Druckvermehrung sogleich wieder verschwindet. Die dynamische Abkühlung, welche mit der Druckveränderung verbunden ist, erzeugt hierbei ebenso wie im aufsteigenden Luftstrom (Bd. 1, S. 591) die Kondensation. Aber die Abkühlung allein genügt nicht zum Erzielen dieser Wirkung, denn die Nebelbildung bleibt aus, wenn wir die im Gefäß befindliche Luft vorher durch feuchte Watte filtriert und dadurch staubfrei gemacht haben. Eine Erklärung dieser Staubwirkung gibt Sir W. Thomson (Proc. Roy. Soc. Edinburgh **7**, 63; 1870. Phil. Mag. (4), **42**, 448; 1871) durch die Erwägung, daß die Verdampfung von einer Flüssigkeitsfläche um so leichter erfolgt, je weniger die Dampfteilchen in der Oberfläche der Flüssigkeit zurückgehalten werden, und daß in der konvex gekrümmten Oberfläche der Tropfen die einzelnen Teilchen weniger Nachbarteilchen haben, die sie zurückhalten können, als in einer ebenen Fläche. Je stärker gekrümmt die Fläche (je kleiner der Tropfen) ist, um so leichter kann die Verdampfung geschehen, und wenn in staubfreier Luft zuerst unendlich kleine Tröpfchen mit entsprechend starker Oberflächenkrümmung sich bilden, so vermögen sie nur bei sehr starker Uebersättigung zu bestehen. Sind dagegen Staubteilchen vorhanden, so können diese als Ansatzkerne dienen und Tröpfchen entstehen lassen, deren Krümmung geringer ist und die also Bestand haben. In der Atmosphäre ist der zur Nebel- und Wolkenbildung erforderliche Staub stets vorhanden; über dem Lande aus Mineral- und Pflanzenteilen bestehend, auf der See aus Salzkörnchen als Resten verspritzter und verdampfter Wassertropfen. Aehnlich wie Staubteilchen können auch Ionen als Ansatzkerne wirken. In aufsteigender (oder sonst ausgedehnter) Luft beladen sich bei beginnender Uebersättigung zuerst die Staubteilchen mit Wassertropfen, bei weiterer Ausdehnung und dynamischer Abkühlung die negativen und zuletzt die positiven Ionen. Für Zimmertemperatur beginnt die Kondensation an den negativen Ionen, wenn das 1,25fache, an den positiven, wenn das 1,38fache Anfangsvolumen erreicht ist, oder wenn der Dampfdruck auf das 4,2- resp. das 6fache des Sättigungsdruckes gestiegen ist.

6. Die Fallwinde. Der Föhn. Zu den durch Luftfeuchtigkeit beeinflußten Vorgängen gehören die „Fallwinde“, absteigende Luftströmungen, von denen namentlich der Föhn bekannt ist. Er pflegt als ein vom Gebirge herabwehender warmer und trockener Wind aufzutreten und wird in der Weise gedeutet, daß die auf der Windseite des Gebirges emporsteigenden Luftmassen vor Erreichung der Kammhöhe zum Taupunkt abgekühlt werden und dann einen Teil ihrer Feuchtigkeit als Niederschlag herausfallen lassen. Dadurch werden sie nicht nur trockener, sondern erlangen vermöge der freiwerdenden Kondensationswärme auch eine höhere Temperatur. Beim Herabfließen auf der Leeseite steigt diese durch dynamische Erwärmung noch weiter, während die relative Feuchtigkeit entsprechend geringer wird. In Figur 1 ist der Temperaturgang bei

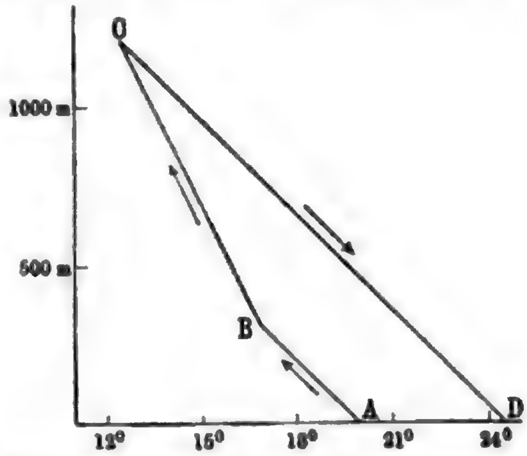


Fig. 1. Temperatur der auf- und absteigenden Föhnluft.

solcher Bewegung dargestellt, wobei die Höhe nach oben, die Temperatur nach rechts gezählt ist. In A beginnt das Aufsteigen mit entsprechender Abkühlung; in B ist der Taupunkt erreicht, und die Abkühlung wird nun infolge Freiwerdens von Kondensationswärme langsamer; in C ist die Luft bis zur Höhe des Gebirgskammes gelangt, und beim nun beginnenden Absteigen bis D findet dynamische Erwärmung statt, so daß schließlich eine der Strecke AD entsprechende Temperaturerhöhung als Ergebnis

Digitized by Google

des Auf- und Absteigens übrig bleibt. Die Föhnluft zeichnet sich durch gesteigerte elektrische Leitfähigkeit, namentlich für positive Elektrizität, aus. Man hat den Föhn nicht nur im Alpengebiet beobachtet, sondern auch in den Vogesen, im Riesengebirge, Thüringer Wald und in zahlreichen anderen Gegenden. Nicht immer gelangt die Föhnluft bis in die Täler hinab, sondern fließt bei entsprechender Gebirgsform in der Höhe darüber hin. Auch in diesem Fall beobachtet man merkwürdigerweise gewisse physiologische Erscheinungen, die für den Föhn charakteristisch sind: Kopfschmerzen, Mattigkeit, Unbehagen, bei Lungenleidenden gesteigerte Neigung zur Lungenblutung u. a. Ohne Vorhandensein eines Gebirges kann gleichfalls Föhn auftreten, wenn die geschilderte Vertikalbewegung sich als Folge der Luftdruckverteilung ausbildet. In solchem Fall spricht man von antizyklonalem Föhn im Gegensatz zum Bergföhn.

7. Hygrometer und Psychrometer. Zur Messung der Luftfeuchtigkeit dienen Apparate, die man als Hygrometer oder Psychrometer bezeichnet. Eine viel benutzte Art bilden die Kondensationshygrometer, bei denen eine blanke Fläche abgekühlt wird, bis sie beschlägt. Die Temperatur, bei welcher dies geschieht, ist der Taupunkt der umgebenden Luft, und dessen Kenntnis in Verbindung mit der Lufttemperatur läßt die absolute und relative Feuchtigkeit finden. Ein Beispiel für diese Apparate ist das in Figur 2 abgebildete Daniellsche Hygrometer. Die mit Musselin umhüllte Glaskugel wird durch Betropfen mit Aether abgekühlt, so daß der Dampfdruck des innen befindlichen Aethers sinkt und von dem in der anderen Kugel befindlichen Aether ein Teil verdampft. Durch die entstehende Verdunstungskälte beschlägt die Außenfläche dieser zweiten Kugel, auf der zwecks genauer Wahrnehmung des entsprechenden Beschlags eine ringförmige „Goldzone“ mit metallisch glänzendem Ueberzug angebracht ist. Das hierbei abgelesene innere Thermometer gibt den Taupunkt, das äußere die Lufttemperatur an.

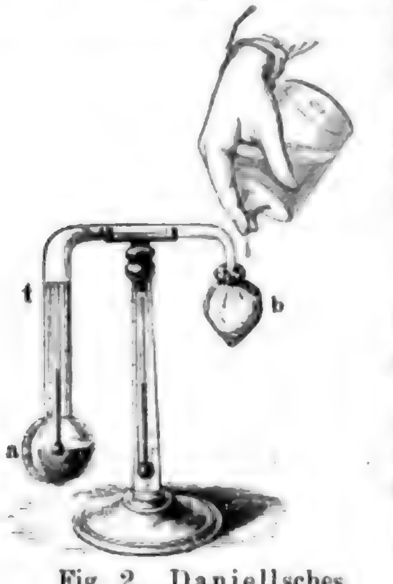


Fig. 2. Daniellsches Hygrometer.

Andere Apparate beruhen auf der Eigenschaft vieler organischer Körper, mit wechselnder relativer Feuchtigkeit ihre Gestalt zu ändern. Als Beispiel hierfür diene das Haarhygrometer (Fig. 3), in dem ein entfettetes Menschenhaar mit seinem oberen Ende befestigt, unten um die Achse des Zeigers gelegt und am untersten Ende durch ein kleines Gewicht belastet ist. Bei wachsender relativer Feuchtigkeit verlängert sich das Haar und bewirkt dadurch entsprechende Einstellung des Zeigers an der Skala. Das Instrument arbeitet nur mit mäßiger Genauigkeit, doch kann man es, wenigstens für hohe Feuchtigkeitsprozente, prüfen und nach Bedarf berichtigen, indem ein mit Musselin überspannter Rahmen naß in das geschlossene Gehäuse des Apparates gebracht wird. Dann ist die innen befindliche Luft alsbald mit Dampf gesättigt, und der Zeiger muß auf 100% stehen oder in seiner Stellung berichtigt werden.

Fig. 3. Haarhygrometer.

Genauer, als diese Apparate, erweist sich das Augustsche Psychrometer (Fig. 4). Es besteht aus einem „trockenen“ Thermometer zur Ermittelung der Lufttemperatur und einem „feuchten“, dessen Gefäß einen dauernd feucht gehaltenen Ueberzug von Musselin trägt. Infolge der Verdunstungskälte steht das feuchte Thermometer tiefer, als das trockene, und zwar um so mehr, je weiter die Luft vom Sättigungszustande entfernt ist und je mehr Dampf sie also

Digitized by Google

von der feuchten Hülle noch aufnehmen kann. Der als „psychrometrische Differenz" bezeichnete Unterschied im Stand beider Thermometer zusammen mit der Luft-

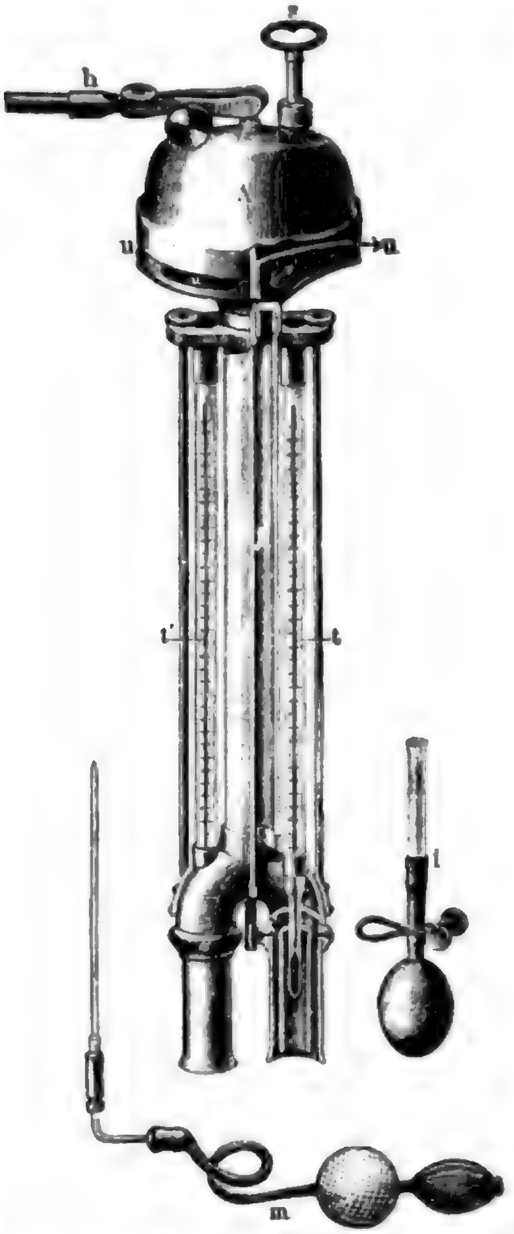


Fig. 4. Augustsches Psychrometer. Nach Assmann.

temperatur läßt die Feuchtigkeit berechnen. Sind t und f die Angaben des trockenen und feuchten Thermometers in Celsiusgraden, m_f der zu f gehörige Sättigungsdruck und b der Barometerstand, beide in Millimetern, so ist die absolute Luftfeuchtigkeit:

$$a = m_f - {}^1/_2 (t - f) \frac{b}{755}.$$

Literatur. *Die wichtigsten Spezialarbeiten sind oben im Text zitiert. Einige Lehr- und Handbücher der Wetterkunde sind am Schluß des Artikels „Atmosphäre" zusammengestellt.*

R. Börnstein.

Feuerkugeln.

Auch Sternschnuppen (vgl. den Artikel „Meteoriten").

Feuerstein, Flint.

Konkretionen gallertartiger Kieselsäure, die allmählich in Quarz umgewandelt wird. Sie kommen hauptsächlich in der weißen Schreibkreide vor (Rügen, Champagne usw.) und sind ausgezeichnet durch große Härte (7) und splitterigen Bruch, daher ihre Verwendung zum Feuerschlagen, zu Waffen und Werkzeugen bei den prähistorischen Menschen. Oft umschließen sie Versteinerungen.

Findlinge

= Erratische Blöcke. So heißen durch das Eis aus ihrer Heimat weit fortgeschaffte Gesteinsblöcke (in Deutschland z. B. schwedische und finnische Gesteine in weiter Verbreitung). Man vergleiche die Artikel „Eiszeiten" und „Quartärformation".

Firn.

Die Schneeansammlungen im Firnfeld, d. h. im Speisegebiet eines Gletschers. Der Firnschnee ist durch seine Grobkörnigkeit ausgezeichnet (vgl. den Artikel „Eis").

Fische.
Pisces.

1. Historisches. 2. Anatomie und Physiologie: a) Körperform, Lokomotion. b) Integument. c) Skelett. d) Muskulatur und elektrische Organe. e) Nervensystem. f) Sinnesorgane. g) Verdauungs- und Respirationstraktus. h) Kreislauforgane. i) Cölom und Urogenitalsystem. 3. Embryologie. 4. Bionomie. 5. System, Verwandtschaftsbeziehungen. 6. Geographische Verbreitung.

1. Historisches. Der zoologische Begriff der Fische umfaßt gegenwärtig wasserbewohnende, wechselwarme craniote Wirbeltiere, von meist gestreckter und seitlich komprimierter Gestalt, stets mit medianen, durch Skelettstrahlen gestützten Flossensäumen und meist mit analog gebildeten freien paarigen Gliedmaßen, mit in der Regel einfacher Herzkammer und -vorkammer und mit Kiemen als definitiven Atmungsorganen; ihre Eier entwickeln sich meist im Freien,

Digitized by Google

dem Embryo fehlen Amnion und Allantois. — Erst 1758 werden durch Linné (Syst. Nat. 10. Aufl.) die (nur) lungenatmenden und viviparen Cetaceen (Artedi's „Plagiuri") ausgesondert (zugleich wird allerdings der Begriff der „Amphibia nantes" für eine Anzahl vordem mit Recht für echte Fische gehaltener Gattungen — Petromyzon, Raja, Squalus, Chimaera, Lophius, Acipenser, Balistes, Syngnathus, Cyclopterus u. a. — errichtet). Der Gesamtheit der Fische geben die meisten Autoren den Rang einer Klasse; Cope (1870), Gill (1872, 1893), Haeckel (1895) u. a. sondern die Cyclostomen als besondere Klasse von derjenigen der gnathostomen Fische ab.

Die Hauptteilung in Knochen- und Knorpelfische, von Ray und Willughby (1686) eingeführt (im Grunde auf Aristoteles zurückgehend), wird von Lacépède (1798 bis 1803) und Cuvier (1828) bewahrt. Nach den Schuppen unterscheidet Agassiz (1844) die Ordnungen Cycloides, Ctenoides, Ganoides und Placoides. Den Begriff der „Ganoiden" in neuer Fassung, basiert auf das Verhalten der Kreislauf- und Atmungsorgane, aufnehmend, stellt Joh. Müller (1846) 6 Subklassen auf: Dipnoi, Teleostei, Ganoidei, Elasmobranchii, Marsipobranchii, Leptocardii. Die letzte wird gegenwärtig wohl allgemein von den Fischen entfernt und der Gesamtheit der cranioten Wirbeltiere als Acrania gegenübergestellt. — Durch Gill (1872) gelangt der von Owen (1866) begründete Begriff „Teleostomi" (im Gegensatz zu den gaumenkauenden Knorpelfischen) zu Bedeutung, dem sich die Teleosteer (Knochenfische s. str.) und die Ganoiden (in mehr oder minder weiter Fassung) einfügen. Die recenten Vertreter der letzteren gliedern sich nun meist in die Gruppen Chondroganoidea (Chondrostei, Knorpelganoiden — Joh. Müller 1846), Hyoganoidea (Holostei, Knochenganoiden — Joh. Müller 1846) und Branchioganoidea (Crossopterygier-Huxley). Als Abteilung der Ganoiden figurieren oft auch die Dipnoer (Agassiz, Günther 1880, Gill 1872), häufiger aber als selbständige Unterklasse (Cope, Zittel 1887 bis 1890, 1895, Smith-Woodward 1889 bis 1895, u. a.) oder als Klasse (Haeckel 1895).

Die folgende Darstellung wird es stets in erster Linie mit den Befunden bei Teleosteern und Elasmobranchiern zu tun haben, weil in diesen beiden Gruppen die reinen und gegensätzlichen Ausprägungen der im Fischtypus enthaltenen Bildungsmöglichkeiten zutage treten. Das Verhalten der Ganoiden, als „Zwischentypen" (s. unten S. 1099, 1104), wird großenteils von jenen aus verständlich; Cyclostomen und Dipnoer weisen dagegen gewisse Tendenzen auf, durch welche die Euichthyes in Beziehung einerseits zu den Acraniern andererseits zu den Amphibien treten (s. S. 1105).

2. Anatomie und Physiologie. 2a) Körperform, Lokomotion. Der Fischkörper bildet eine geschlossene Masse, in welcher Kopf, Rumpf und Schwanz äußerlich nicht scharf abgesetzt sind; sie nähert sich meist einer Spindelgestalt (Fig 1b, c), die aber ihre größte Höhe und Breite näher dem Vorderende erreicht und die durch eine vertikal mehr oder minder entfaltete Schwanzflosse gestört wird. Im Vorderkörper ist die Mehrzahl der wichtigen inneren Organe konzentriert; der Schwanz ist vorwiegend muskulös. In der Regel (besonders bei Acanthopterygiern, den extremen Vertretern des Fischcharakters; vgl. Fig. 1d, e), ist der Körper seitlich stark komprimiert; weniger ausgesprochen ist dies bei gewissen Physostomen (z. B. den Welsen, aber auch bei Bodenformen anderer Gruppen, z. B. Lophius), bei den Ganoiden und Elasmobranchiern, unter welch letzteren sogar die äußerste dorsiventrale Abplattung erreicht wird (Rochen, Fig. 1a). Die paarigen Extremitäten, Brustflossen (P) und Bauchflossen (V), sind allgemein schwach entwickelt (im Vergleich mit denen der Landtiere, welche als „Beine" die Körperlast tragen); es sind ruderartige Platten, deren vorderes Paar dicht hinter der Kiemenregion steht, während das hintere bald „abdominale" Lage einnimmt, bald „brust-" oder „kehlständig" wird oder auch ganz schwindet (viele Teleosteer); Brust- und Bauchflossen fehlen den Symbranchiden, Muraena, Nerophis, sowie allen Cyclostomen. Demgegenüber sind die vertikalen Körperanhänge, unpaare Flossen, stets bedeutend entfaltet und meist in eine oder mehrere Rückenflossen (D), Schwanzflosse (C) und Afterflosse (A) gesondert (Fig. 1d); eine bei Salmoniden und Siluriden auftretende hintere strahlenlose Rückenflosse wird als Fettflosse bezeichnet (Fig. 1c). Bei den Larven, bisweilen auch bei den erwachsenen Tieren (Zoarces, Cepola), hängen sie fortlaufend zusammen. Die Schwanzflosse fehlt bei vielen sogenannten taenioformen Fischen (Trichiurus u. a.), sowie bei Hippocampus und Nerophis, wo ein „Greifschwanz" vorliegt. — Die Flossen sind zarte Hautsäume, die durch Skelettelemente verschiedener Art (s. u. S. 1069), bei Teleosteern durch knöcherne gegliederte oder ungegliederte Strahlen bezw. durch Stacheln gestützt werden. Isolierte Flossenstrahlen dienen u. a. als Wehrorgane („Stichlinge"), bei Lophius als Angelapparat, bei Trigla und Peristethion zum Tasten und Kriechen.

Der Mund liegt be den „Teleostomen"

Digitized by Google

in der Regel terminal (Ausnahmen: Loricariiden, Agonus u. a.), bei den Elasmobranchiern und Chondrosteern ist er unterständig, von einem mehr oder minder bedeutenden Rostrum überragt. Der After bekennzeichnet meist äußerlich das hintere Ende der Leibeshöhle (und damit des „Rumpfes"); in besonderen Fällen jedoch rückt er weit nach vorn (s. u. S. 1084).

Für die Lokomotion (vgl. Bd. I, S. 1086) sind die Flossen nur von nebensächlicher Bedeutung; sie dienen teils zur Erhaltung des Gleichgewichts — (der Schwerpunkt liegt meist über der Mitte!) — teils zum Lenken oder Hemmen der Bewegung. Ausnahmen machen die Syngnathiden, die sich allein durch undulierende Bewegungen der Rücken- und Brustflossen fortbewegen; ferner der Zitteraal und Verwandte, bei denen die sehr lange Analis, und die Gymnarchinen, bei denen die Dorsalis in gleicher Weise wirken; endlich die Rochen, die vermittelst wellenförmiger Bewegungen der mächtigen mit den Körperseiten verwachsenen Brustflossen schwimmen. Bei den übrigen Fischen wird der hauptsächliche Antrieb gegeben durch transversale (durch von vorn nach hinten fortschreitende alternierende Kontraktionen des Seitenmuskels bedingte) Undulationen des gesamten Körperstammes (Strasser, Zur Lehre von der Ortsbewegung der Fische, 1882). Auch die Plattfische schwimmen so; aber, wie in der Ruhelage, die Körperseiten horizontal stellend. Diese Exkursionen sind notwendig ausgiebiger bei langgestreckten niedrigen Formen, ge-

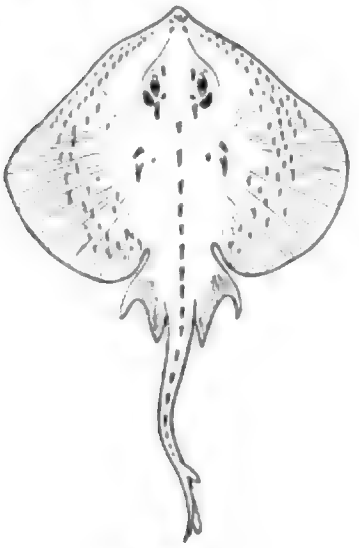


Fig. 1a.

Fig. 1b.

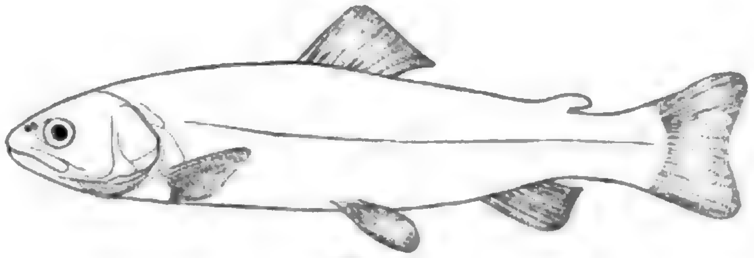


Fig. 1c.

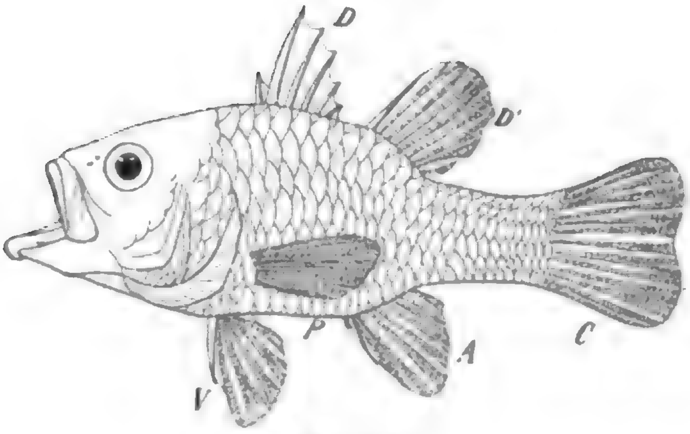


Fig. 1d.

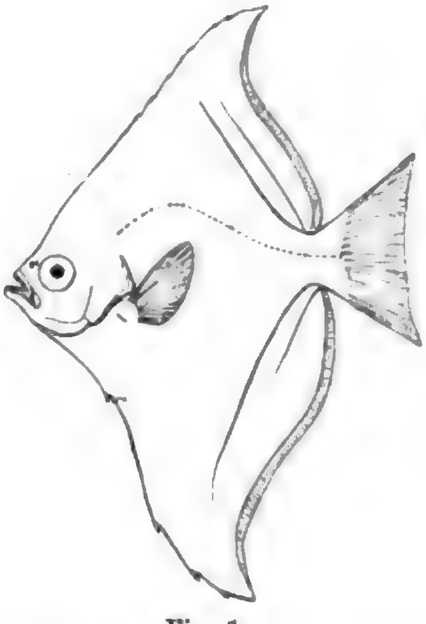


Fig. 1e.

Fig. 1. Charakteristische Umrisse: a) Raja radiata (Rückenansicht), b) Spinax niger, c) Salmo fario, d) Apogon trimaculatus, e) Psettus sebae (b—e Profile).

Digitized by Google

ringfügiger (aber wirksamer) bei hohen und kurzen; der die Eingeweide bergende Vorderkörper beteiligt sich an ihnen in geringerem Maße als der muskulöse Hinterkörper („Schwanz"). Der Lachs soll eine Geschwindigkeit von 8 m in der Sekunde erreichen und auf seinen Wanderungen etwa 40 km innerhalb 24 Stunden zurücklegen.

Von den „fliegenden Fischen" schnellt Exocoetus sich durch eine Schwimmbewegung aus dem Wasser, die großen Brustflossen nur als Fallschirm benutzend; Dactylopterus macht Flatterbewegungen. Aehnliche Gewohnheiten hat auch ein afrikanischer Süßwasserfisch, Pantodon buchholzi (Malacopterygier). — Einzelne Knochenfische vermögen sich gut auf dem Lande zu bewegen: Periophthalmus (mit armartig vortretenden Flossenwurzeln) läuft und klettert geschickt; Welse, wie Doras und Callichthys, unternehmen gemeinschaftlich weite Landwanderungen; ähnlich Anabas, Ophiocephalus u. a. Ceratodus soll sich im Wasser auf den Vorderflossen erheben (vgl. a. Fig. 48) und mit ihnen alternierende gangartige Bewegungen ausführen (Dean).

Viele Teleosteer sind mit Haftapparaten versehen, die ihnen im Kampf gegen Strömung und Wellenbewegung oder zu einer Art Lokomotionsparasitismus (Echeneis) dienen. Gobius und Cyclopterus haben eine von den verwachsenen Bauchflossen gebildete, Lepadogaster eine kompliziertere ventrale Haftscheibe; die große Saugplatte von Echeneis liegt dem Schädel und vorderen Rückenabschnitt auf, sie entspricht in den wesentlichen Teilen ihrer Skelettstücke und Muskeln einer vorderen Rückenflosse. Die Loricariiden saugen sich mit dem Munde an; ähnlich, aber mehr zur Ausübung des fakultativen Parasitismus (s. S. 1096), die Petromyzonten; bei gebirgsbewohnenden Cypriniden (Gastromyzon) und Siluriden (Pseudecheneis) kommen bruständige Haftscheiben vor, die an die der Froschlarven erinnern. Ueber Haftorgane der Larven siehe S. 1093.

2b) Integument. Die Hautdecke besteht aus der mehr- bis vielschichtigen Epidermis und dem bindegewebigen Corium. Erstere enthält außer indifferenten (Deck-)Zellen fast stets Schleimzellen, die in den tieferen Schichten entstehen und allmählich an die Oberfläche rücken, häufig auch seröse (acidophile) Drüsenzellen oder Kolbenzellen.

Die Kolbenzellen finden sich bei den Teleosteern mit Cycloidschuppen oder nackter Haut; es sind umfangreiche Gebilde mit einem oder mehreren zentral gelegenen Kernen, die unter Verdichtung ihres acidophilen feinkörnigen Inhalts nach außen rücken und endlich ausgestoßen werden. Aehnliche Elemente enthält die Haut von Petromyzon; den Selachiern fehlen sie. — Mit Ausführgang versehene einzellige acidophile Drüsen finden sich bei vielen Teleosteern (Lepadogaster, Loricariiden, Syngnathiden u. a. m.); allgemein bei den Haien, denen Schleimdrüsen fehlen; bei den Rochen aber sind letztere zahlreich (Kwietniewski).

Giftdrüsen, die zu gewissen Hautstacheln (auf dem Kiemendeckel, Flossenstacheln usw.) in Beziehung stehen, finden sich bei Scorpaena, Trachinus, Uranoscopus, bei Plotosus u. a. Siluriden, bei Trygon, Myliobatis u. a. m. Stets scheint es sich um Anhäufungen acidophiler Drüsenzellen zu handeln, die sich bisweilen als kompakte Massen von der Epidermis sondern und gelegentlich fakultative Ausführgänge erhalten (Pawlowsky, Anatomischer Anzeiger, Vol. 34, 1909). — Bei den Myxinoiden findet sich jederseits eine Reihe großer von modifizierten Kolben- („Fadenkörper"-) und „Blasenzellen" erfüllter „Schleimsäcke" (Retzius, Biologische Untersuchungen, Bd. 12, 1905). — Bei Protopterus bildet das Sekret der Hautdrüsen einen das Tier während des Sommerschlafes einhüllenden Kokon.

Cilien trägt die Epidermis nur embryonal bei Selachiern. Häufig begrenzt die äußere Zellenschicht ein senkrecht gestreifter Cuticularsaum. Besondere Mächtigkeit erreicht die Cuticula am Saugnapf von Lepadogaster; die Stachelchen auf der Haut von Discognathus und die Kappen der sogenannten Flammenzellen von Hippocampus sind hier wohl anzureihen. — Verhornung der oberflächlichen Lage (in leichtem Maße) tritt ein bei Salmo fario (Maurer), lokal an den Mundrändern von Ceratodus (Ayers, Jenaische Zeitschrift für Naturwissenschaft, Vol. 18, 1885), an der Unterlippe mancher Cypriniden (Pawlowsky, Zoologisches Jahrbuch, Abteilung für Anatomie, Vol. 31, 1911), in Form zähnchenartiger Gebilde auf den Lippen von Plecostomus (Rauther, ibid.). Besondere rundliche oder kegelförmige Hornbildungen bilden den sogenannten Perlausschlag brünstiger Cypriniden; sie entstehen zum Teil an Stelle zugrundegehender Hautsinnesorgane (Maurer). — Die „Zähne" im Vestibulum oris und auf der Zunge von Petromyzon bestehen aus kegelförmigen Massen verhornter Epidermiszellen, die sich über einer Cutispapille erheben; unter den funktionierenden bilden sich Ersatzzähne.

Hauptsächlich der Epidermis zuzurechnende Bildungen sind endlich die Leuchtorgane. Sie finden sich vorwiegend bei Tiefsee-, aber auch bei Oberflächenfischen (Porichthys und den Carangiden Anomalops und Photoblepharon, bei Spinaciden und anderen pelagischen Se-

Digitized by Google

lachiern [Burckhardt, Ann. Mag. N. H. (7) Vol. 6, 1900]). Sie bestehen im wesentlichen aus einer Gruppe von Drüsenzellen, deren Sekret meist intracellulär leuchtet; dazu kommen oft eine linsenartige Zellengruppe, Reflektoren, Pigmenthüllen, gelegentlich auch Muskeln zur Bewegung des Organs (Chauliodus u. a.). Das Leuchten ist wahrscheinlich kontinuierlich, nicht vom Willen abhängig, doch reflektorisch beeinflußbar. Diese meist kleinen, in Reihen an den Körperseiten (oft in sehr großer Zahl, bei Porichthys gegen 700; vgl. Fig. 30) stehenden Organe scheinen einen ähnlichen bionomischen Wert zu haben wie die Zeichnungen und Schmuckfarben der Bewohner erhellter Wasserzonen (Brauer), d. h. die Artgenossen einander kenntlich zu machen und zur Fortpflanzungszeit die Geschlechter anzuziehen. Bemerkenswert ist indessen das Vorkommen von Leuchtorganen bei blinden Fischen (Ipnops). Größere solitäre Leuchtorgane, vielleicht zum Anlocken von Beutetieren geeignet, stehen auf verlängerten Flossenstrahlen bei Tiefsee-Pediculaten (Gigantactis), auf Bartfäden (Stomias), am unteren Augenrand usw. Sie zeigen oft den Bau alveolärer Drüsen, mit wohlerhaltenem oder rudimentärem Ausführgang, in deren Lumen das Leuchtsekret sich sammelt (Näheres siehe bei Brauer, Wissenschaftliche Ergebnisse der Deutschen Tiefseeexpedition, Vol. 15, 1906; Gatti, Roma 1903; Greene, Journ. Morph. Vol. 15; Mangold, Arch. ges. Physiol. 1907; Steche, Zeitschr. wissensch. Zool. Vol. 93, 1909 u. a.). — Der Umstand, daß bei Porichthys Leuchtorgane und Endhügel (s. u.) in derselben Reihe alternieren, ja einander vertreten, auch zum Teil in engem wechselseitigem Zusammenhange entstehen, scheint eine gewisse Verwandtschaft von beiderlei Bildungen anzudeuten. Diese Annahme würde verständlich machen, daß so viele sehr verschiedenen systematischen Abteilungen zugehörige Tiefseefische gestaltlich sehr ähnliche Leuchtorgane ausgebildet haben. Allerdings werden die kleinen kompakten Organe nur von schwachen Hautnerven versorgt; Gatti vergleicht sie den Perlorganen.

Das Corium sondert sich meist in eine äußere lockere Zone und eine innere, die aus derben parallelfaserigen Bindegewebsbündeln gebildet ist, welche sich in abwechselnden Lagen diagonal kreuzen und oft von senkrecht zur Oberfläche aufsteigenden Strängen durchsetzt werden.

Farbstoffzellen (Chromatophoren) liegen vorwiegend in der lockeren subepidermalen Schicht; sie enthalten teils bräunliche oder schwarze Pigmente (Melanine), teils gelbe und rötliche (Lipochrome). „Iridocyten", mit stark lichtbrechenden Körperchen (Guanin) erfüllt, bedingen ein mattes Weiß oder Silberglanz oder, in Verbindung mit den Chromatophoren, blaue und grüne Töne. Beide Arten von Chromatophoren sind von aus dem Sympathikus stammenden Fasern innerviert; Reizung bewirkt Zusammenballung, Erschlaffung das Ausströmen des Pigments in die Zellfortsätze. In der Anordnung der Pigmentzellen finden sich häufig Beziehungen zur Körpermetamerie bezw. zur Hautinnervation (Rynberk). — Lebhafte Färbungen und Zeichnungen treten vorwiegend bei den geringe Tiefen bewohnenden Teleosteern, besonders den tropischen (Chaetodontidae, Labridae u. a.) auf; Bodenformen sind meist protektiv gefärbt (wofern sie nicht besonders geschützt sind, wie der mit blauen Augenflecken versehene Zitterroche); zu eigentlich imitatorischen (Mimicry-) Wirkungen steigern sich diese Anpassungsfärbungen bei Scorpaeniden und Lophobranchiern; so nehmen die Seenadeln den Habitus von Seegrasblättern an, die gefüllte Bruttasche der ♂♂ gleicht auffallend den Blütenständen derselben (Heincke). Hochseefische haben meist lebhaften Silberglanz (Clupeiden, Regalecus Trachypterus u. a. m.), nächtliche Fische und Bewohner trüber schlammiger Gewässer (Welse u. a.) einförmig dunkle Töne, ähnlich die Tiefseefische; einzelne von letzteren (Barathronus), sowie Höhlenfische (Amblyopsis), sind fast pigmentlos, manche pelagische Larven (Leptocephali) glasartig. Bei Elasmobranchiern herrschen dunkle gleichförmige Färbungen vor. Im allgemeinen ist bei den klares Wasser bewohnenden Fischen der Rücken dunkel, der Bauch hell gefärbt; einige Welse (Synodontisarten), die zeitweilig mit dem Bauche nach oben schwimmen, verhalten sich umgekehrt. Bei den Plattfischen ist die blinde, zum Boden gewandte Seite farblos, kann aber durch künstliche Beleuchtung von unten pigmenthaltig gemacht werden. — Sehr vollkommenes Vermögen des (protektiven) Farbenwechsels kommt vor allen den Plattfischen zu, derart, daß sie sich nicht nur jeweils dem Ton, sondern auch der Zeichnung des Grundes weitgehend anähneln (Sumner, Journ. exper. Zool. Vol. 10, 1911); an Forellen, Schmerlen, Lippfischen u. a. m. hat man Beobachtungen über ein der Umgebung entsprechendes Heller- oder Dunklerwerden bezw. Anpassung im Farbenton gemacht — Reaktionen, die stets durch Gesichtsempfindungen vermittelt werden. Außer der reflektorischen Umlagerung der Pigmente scheint bisweilen auch eine adaptative Veränderung derselben unter direktem Lichteinfluß vorzukommen (Secerov, Archiv für Entwickelungsmechanik, Bd. 28, 1909; seine Angaben werden neuerdings bestritten). Besondere Habitusveränderungen treten viel-

Digitized by Google

fach in der Fortpflanzungszeit auf („Hochzeitskleider"), meist als lebhafte Schmuckfarben beim ♂ (bei den Nerophis-Arten beim ♀!), bei den Cypriniden als Ausschlag kleiner weißlicher Hornbildungen (Perlorgane); bisweilen betreffen die Veränderungen aber auch Vergrößerung von Körperanhängen (Flossenstrahlen) u. dgl.; beim ♂ von Lepidosiren bilden sich an der Bauchflosse rote fadenförmige Emergenzen.

Vornehmlich dem Corium gehören die Hartgebilde des Integuments der Lage nach an. Die Placoidorgane der Elasmobranchier entstehen an der Grenze zwischen Epidermis und Corium, in Kontinuität mit der Basalmembran. Die jüngere Anlage besteht in einer papillenartigen Anhäufung von Coriumzellen (Odontoblasten, Scleroblasten), welche die innere Epidermisfläche vorwölbt; in diesem Bezirk nehmen die basalen Epidermiszellen (Ameloblasten) hohe prismatische Gestalt an. Zwischen ihnen und dem bindegewebigen Zahnkeim wird Hartsubstanz abgeschieden: zu äußerst eine homogene Schmelzschicht (der die Basalmembran als Oberhäutchen aufliegt), innen eine knochenartige, zarte Fortsätze der Odontoblasten einschließende und daher von feinen Röhrchen durchsetzte Masse (Dentin). Der fertige Zahn (Fig. 2a) enthält eine von Bindegewebe, Gefäßen und Nerven erfüllte Pulpahöhle; seine nach hinten gerichtete Spitze durchbricht die Hautoberfläche; seine Basis erfährt meist eine Verbreiterung in Form einer rhombischen (aus osteoider Substanz ohne Dentinstruktur bestehenden) Basalplatte. Derartige Hautzähne werden beständig nachgebildet; sie ordnen sich meist, den Zügen der Coriumfasern entsprechend, in diagonalen Reihen an (Fig. 2b).

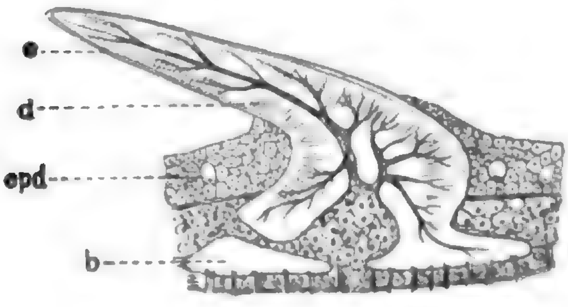


Fig. 2a.

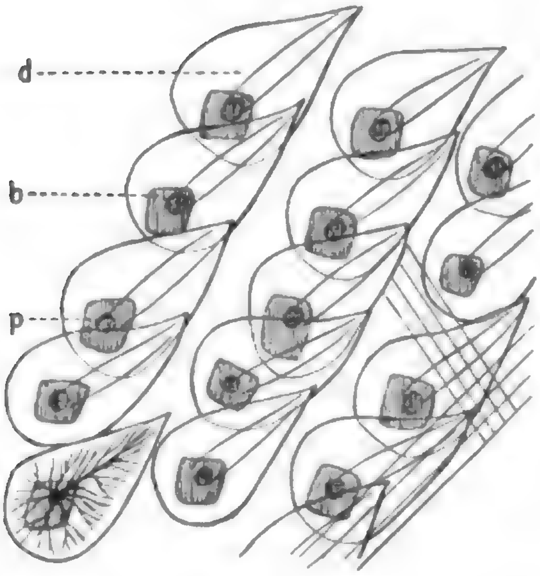


Fig. 2b.

Fig. 2. Mustelus laevis. a) Längsschnitt durch einen Hautzahn. Nach O. Hertwig, Jenaische Zeitschrift f. Nat., 1874. b) Anordnung der Placoidschuppen in der Haut (die Richtung der Cutisfasern rechts unten angedeutet, die Verzweigung der Odontoblastenausläufer nur in einem Hautzahn ausgeführt); e Schmelz, d distaler Teil des Placoidorgans bezw. Dentin, b Basalplatte, epd Epidermis, p Pulpahöhle.

Die Hautskelettelemente der Teleosteer entstehen fast stets in einigem Abstand von der Epidermis und sind allseitig von Bindegewebe umhüllt; sie enthalten in der Regel einen den tieferen Coriumschichten zugehörigen Anteil in Form einer Platte aus echter Knochen- oder osteoider (zellenloser) Substanz, in welcher sich die Struktur des Coriums mehr oder minder deutlich erhält. Hierzu kommen oft distale Bestandteile, deren Beziehungen zu Hautzähnen nicht überall gut zu präzisieren sind. Bei der Mehrzahl tritt als Hautskelettelement die Schuppe auf, ein rundliches dünnes Knochenplättchen, dessen Oberfläche zarte Leisten, in der Aufsicht als um eine Art Wirbel konzentrisch geordnete Linien erscheinend, trägt. Der Vorderrand ist grob gezackt oder gerundet, der Hinterrand glatt (Cycloidschuppen, Fig. 3a) oder mit mehr

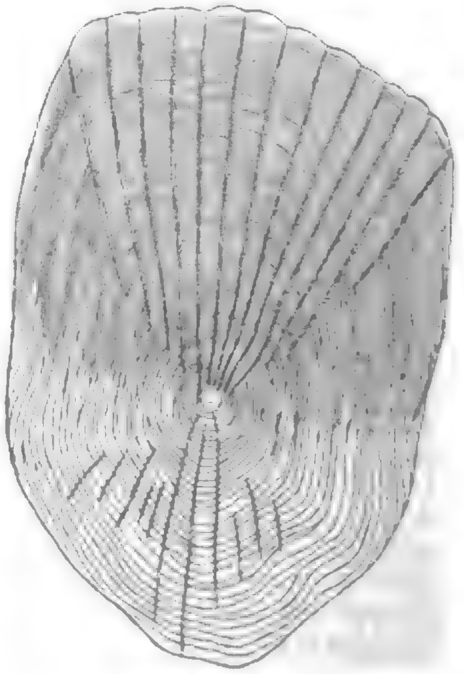


Fig. 3a.

Digitized by Google

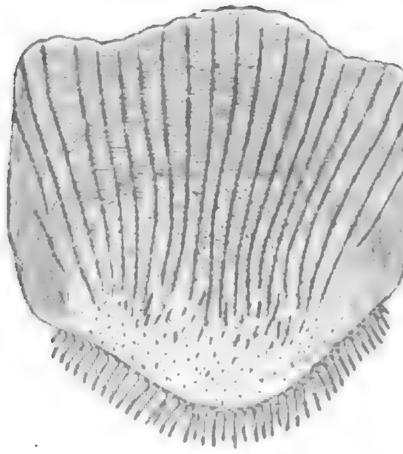


Fig. 3b.

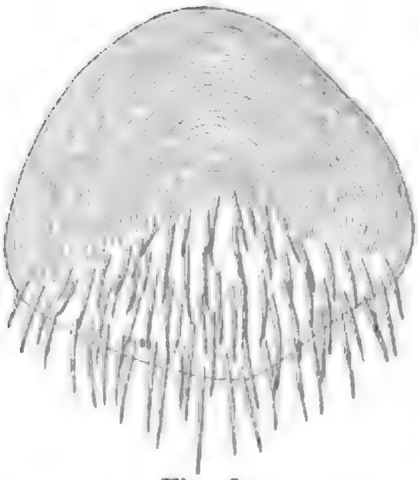


Fig. 3c.

Fig. 3. Teleosteerschuppen a) von Crenilabrus pavo, b) von Gobius capito, c) von Capros aper.

oder minder zahlreichen soliden Zähnchen besetzt (Ctenoidschuppen, Fig. 3, b und c). Vom Rand zum Wirbel laufen oft mehrere starke radiale Linien (Furchen). Die Schuppe besteht aus einer distalen homogenen Lage (Hyalodentinschicht) und einer dickeren inneren, entsprechend der tieferen Coriumschicht faserig strukturierten; jene, in den Radialfurchen unterbrochen, bildet allein die Ringleisten und Zähnchen (Hase, Jenaische Zeitschrift für Naturwissenschaft, Vol. 42, 1907.— Charakteristisch ist die schräge Einlagerung der Schuppen in die Haut, wobei sie sich „dachziegelartig" derart übereinanderschieben, daß der tiefer liegende Vorderteil jeder Schuppe von den beiden Nachbarn und von der voraufgehenden Schuppe bedeckt wird; sie nehmen quincunxiale Stellung ein, es können daher longitudinale, transversale und diagonale Reihen gelesen werden (vgl. Fig. 1d). Dabei richtet sich die Anordnung meist nach der Gliederung des Seitenmuskels (Fig. 4), derart, daß jedem W-förmig geknickten Myomer eine (Cyprinus, Leuciscus) oder zwei (Tinca, Salmoniden) Schuppenreihen entsprechen (Hase). — Häufig kommt es durch Auflockerung des die Schuppen umgebenden Gewebes zur Bildung sogenannter Schuppentaschen.

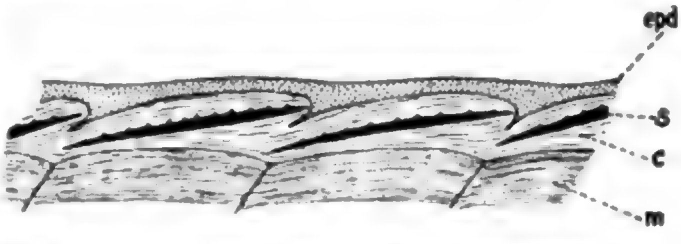


Fig. 4. Frontalschnitt durch die Haut eines jungen Leuciscus. Nach Hase. epd Epidermis, s Schuppe, c Corium, m Muskelsegment.

Es fehlt bei den Teleosteern nicht an Hartgebilden, die sich, sei es im Habitus, sei es in der Struktur, den Befunden bei Selachiern nähern. So finden sich auf den großen Knochenschuppen der Loricariiden und von Callichthys beweglich angebrachte echte Hautzähnchen. Die hohlkegelförmigen Ossifikationen von Cyclopterus, die teilweise zu größeren Komplexen verschmelzen, zeigen Dentinstruktur (Hase, Jenaische Zeitschrift für Naturwissenschaft, Vol. 47, 1911), nicht aber die Entstehungsart echter Zähne. Die stachel- und zahnartigen Bildungen, die sich einzeln oder zu mehreren auf größeren Platten stehend unter Pediculaten, Scombroiden (Diana), Trigliden, bei Centriscus und Plectognathen finden (O. Hertwig, Morphologisches Jahrbuch, Vol. 7, 1882), verhalten sich doch nach Struktur und Genese abweichend von echten Zähnen. Beachtenswert ist, daß im Beginn der Schuppengenese über der Skleroblastenanhäufung eine Erhöhung der basalen Epidermiszellen, ein „rudimentäres Schmelzorgan", vorübergehend auftritt (Hofer, Hase).

Eigenartig verhält sich der Panzer der Syngnathiden (Fig. 5); er besteht aus 7 (am

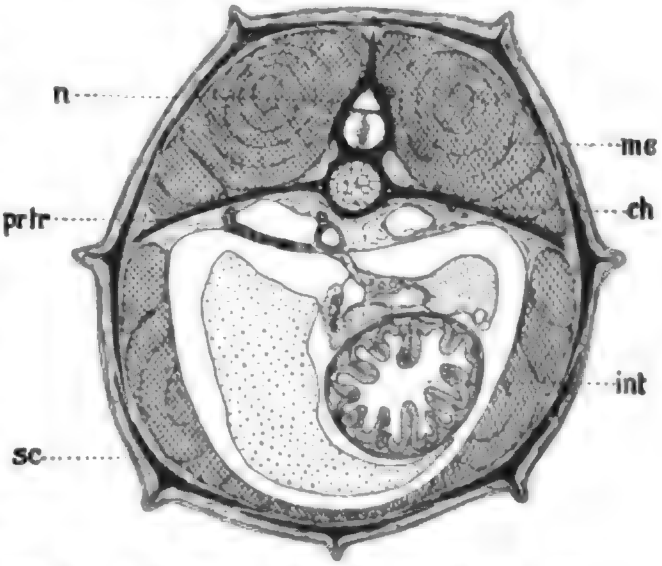


Fig. 5. Querschnitt durch den Rumpf von Syngnathus; ch Chorda, n Neuralbogen, prtr Querfortsatz, sc Hautskelettschilder, int Darm, mc Myocommata (die Muskulatur doppelt schraffiert); die Leber ist grob, das Pankreas fein punktiert.

Digitized by Google

Schwanz 4) Längsreihen winklig geknickter Schilder, die eine derjenigen der Wirbel gleiche Zahl von Panzerringen biden; dabei greift der obere Flügel jedes Schildes über den unteren, der vordere Rand über den hinteren der Nachbarschilder. Die Schilder verbinden sich durch ineinander greifende Rinnen und Leisten. In den Lücken zwischen den Hauptschildern liegen meist kleine Zwischenschilder. Analoge Hautskelettelemente finden sich bei Solenostoma, Centriscus und (nahtartig miteinander verbunden) bei Amphisile. Die Beziehungen der Panzerbildungen bei Pegasus und den Ostraciontiden zu den vorigen sind noch nicht sicher zu beurteilen.

Die Hautskelettelemente der als Ganoiden zusammengefaßten Gruppen entstehen aus umfangreichen Coriumverknöcherungen, meist unter mehr oder minder entschiedener Beteiligung echter Hautzähne. Bei Lepidosteus treten embryonal, gesondert von der eigentlichen, der tieferen Coriumschicht angehörigen Schuppenanlage, Hautzähne auf, von welchen aus sich eine durch Glanz und Härte ausgezeichnete Außenlage (Williamsons „Ganoin"-Schicht) über die Schuppe ausbreitet; die Zähne selbst verkümmern (Klaatsch, Morphologisches Jahrbuch Vol. 16, 1890). Die Schuppen sind rhombisch, übrigens wie die der Teleosteer geordnet, wenngleich mit weniger ausgiebiger wechselseitiger Deckung; vordere und obere Gelenkfortsätze dienen zu ihrer Verbindung. Die rezenten Crossopterygier (vgl. Fig. 54) verhalten sich ähnlich; außer den frei oberflächlich stehenden Zähnchen finden sich Reste solcher zwischen die Ganoinschicht und die proximalen vaskularisierten Knochenschichten eingeschlossen (Cosminschicht). Amia hat normale Cycloidschuppen. Acipenser ist am Schwanze mit rhombischen Schuppen, sonst mit größeren bestachelten Schildern und kleineren Hautstacheln bedeckt, Spatularia nur mit letzteren: Coriumverknöcherungen, zwar ohne eigentliche Zahnstruktur, von Hertwig (Morphologisches Jahrbuch, Vol 2, p. 390), indessen als geweblicher Rückbildung verfallene Placoidorgane aufgefaßt. Modifizierte Hautverknöcherungen, die den Vorderrand der unpaaren Flossen bedecken, werden als Flossenschindeln, Fulcra, bezeichnet (vgl. Fig. 20). — Die Schuppen der rezenten Dipnoer erinnern an cycloide Teleosteerschuppen; Beteiligung der Epidermis bei ihrer Bildung ist nicht nachgewiesen und die auf ihnen stehenden soliden Höckerchen werden daher (und wegen des Mangels von Schmelz, Dentinstruktur usw.) nicht für Hautzähnen vergleichbar erachtet.

Nackte Formen, solche, die das Hautskelett ganz oder teilweise eingebüßt haben, finden sich in allen Hauptgruppen (Holocephalen, Torpedo; Polyodontiden; Siluriden, Gymnotus [Electrophorus], Lepadogaster u. a). Aller Hartgebilde entbehrt auch die Haut der Cyclostomen. Beachtenswert ist, daß bei allen sogenannten elektrischen Fischen das Hautskelett fehlt oder sehr reduziert ist. Im allgemeinen läßt sich ein reziprokes Verhältnis in der Entfaltung des Hautskeletts und der (acidophilen) Hautdrüsen bzw. Kolbenzellen feststellen.

2c) Skelett. Das Skelett gliedert sich in die Schädelkapsel (Neurocranium), die Kiefer- und Kiemenbogenstücke (Visceralschädel, Splanchnocranium), die Wirbelsäule und ihre Anhänge, die Extremitätengürtel und das Flossenskelett. Seiner geweblichen Beschaffenheit nach ist das (Innen-)Skelett der Elasmobranchier und der Cyclostomen knorpelig, das der Teleosteer, Holosteer und Crossopterygier vorwiegend knöchern; bei den Dipnoern und Chondrosteern ist der Ersatz des knorpeligen durch das knöcherne Skelett sehr unvollkommen. Echter Knochen kommt dem Skelett der Dipnoer, Ganoiden und der meisten Physostomen (Siluriden, Cyprinoiden, Salmoniden, Clupeiden usw.) sowie dem von Thynnus zu; bei den übrigen Teleosteern entbehrt das Knochengewebe der Knochenkörperchen, es besteht aus „osteoider Substanz" (Kölliker). — Als erstes embryonales Skelettgebilde tritt die Chorda dorsalis auf, ein axialer Gewebsstrang von epithelialer (entodermaler) Herkunft, der eine zarte elastische äußere und eine dicke faserige innere Scheide erhält, innerhalb welcher die Zellen sich zu dünnwandigen, mit Flüssigkeit erfüllten Kämmerchen umwandeln; so erlangt die Chorda bedeutende Rigidität. Meist wird sie später durch Wirbelbildungen mehr oder minder verdrängt.

Der Schädel der Elasmobranchier (Fig. 6) ist eine wenig gegliederte, vorn spitz oder mit drei Rostralknorpeln — (einem ventro-medianen und zwei seitlich von den Nasenkapseln entspringenden, die meist nach vorn hin konvergieren) — endende Knorpelkapsel, hinten mit weiter Oeffnung zum Durchtritt des Rückenmarks, seitlich mit Nervenlöchern versehen; seitliche Höhlungen (Orbitae) nehmen die Augenbulbi, besondere Kapseln die Nasengruben und das Ohrlabyrinth auf. Der Schädelbasis, bezw. den ersten Wirbeln, schließen sich gegliederte knorpelige „Visceralbögen" an, deren vorderster aus einem oberen (proximalen) Stück — Palatoquadratum — und einem distalen — Mandibula. Unterkiefer — besteht. Bei den Rochen und einem Teil der Haie (s. S. 1098) ist dieser „Kieferbogen" nur vermittels eines knorpeligen Stiels mit der occipitalen Schädelregion

Digitized by Google

gelenkig verbunden, den man als ein proximales Stück des folgenden „Hyoidbogens“ betrachtet und daher als Hyomandibulare bezeichnet („Hyostylie“ Huxley). Bei anderen Haien bildet der Gaumenteil des

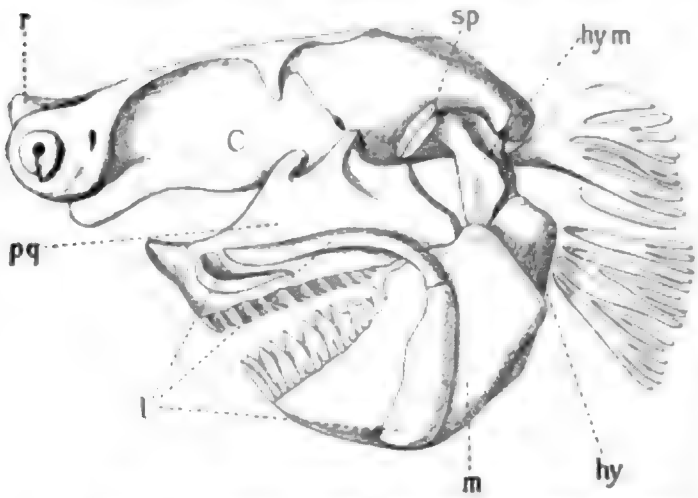


Fig. 6. Schädel von Scymnus. Nach Gegenbaur 1872. r Rostrum, pq Palatoquadratum, m Mandibel, l Labialknorpel („Prämaxillar“-, „Maxillar“- und „Prämandibular“-Knorpel), hym Hyomandibulare, hy Hyoid (letztere Radien tragend).

Palatoquadratum einen zu einer Verbindung mit der Basis des Craniums (Junctura ethmopalatina) dienenden Fortsatz (Processus palatobasalis) aus, der Quadratteil oft einen ähnlichen postorbitalen; bei den Notidaniden tritt der letztere in eine mehr oder minder feste Verbindung mit dem Schädel, ohne daß zugleich eine lose Anlehnung an das Hyoid aufgegeben wird („Amphistylie“). Als weitere Teile des Hyoid- oder Zungenbeinbogens schließen sich dem Hyomandibulare distalwärts ein Ceratohyale und ein unpaares Basihyale an. Zwischen dem Palatoquadratum und dem Hyomandibulare finden sich 1 bis 4 sogenannte Spritzlochknorpel; sie werden meist als Radien (s. u.) des Kieferbogens aufgefaßt, sie fehlen nur den Notidaniden. Nach hinten vom Hyoid folgen meist 5 (bei Notidanoiden 6 bezw. 7) Paar Branchial- oder Kiemenbögen (Fig. 7), höchstens je aus 4 Gliedern (Pharyngo-, Epi-, Cerato- und Hypobranchiale) bestehend; sie sind ventral durch unpaare mediane Stücke verbunden, Copulae, deren Zahl ursprünglich wohl derjenigen der Bögen entsprach, bei allen bekannten Formen aber mehr oder minder bedeutende Reduktion erfährt. Bei den Holocephalen (Fig. 8) verwächst (unter Ausschaltung des Hyomandibulare) das Palatoquadratum mit dem Schädel, mit dem der Unterkiefer also direkt artikuliert („Autostylie“); die Kiemenbögen drängen sich unter dem Schädel zusammen; den Spritzlochknorpeln entspricht ein isoliertes Knorpelchen hinter dem Kiefergelenke (Hubrecht). — Vor dem Mandibularbogen liegen — bei den Holocephalen besonders entfaltet — die Labialknorpel, meist ein vorderer oberer und ein oberer und ein unterer hinterer, welch letztere bogenförmig zusammenschließen; die oberen entsprechen der Lage nach Zwischen- und Oberkiefern der Teleostomen (Cuvier). Gegenbaur (Kopfskelett der Selachier, 1872) deutete die Lippenknorpel als Reste prämandibularer Visceralbögen. Den Zahnbesatz des oberen (vorderen) Mundrandes trägt das Palatoquadratum. Der äußere konvexe Rand der Kiemenbögen ist mit einer Reihe von knorpeligen „Kiemenstrahlen“ (Septalradien) besetzt; sie sind bei den Rochen

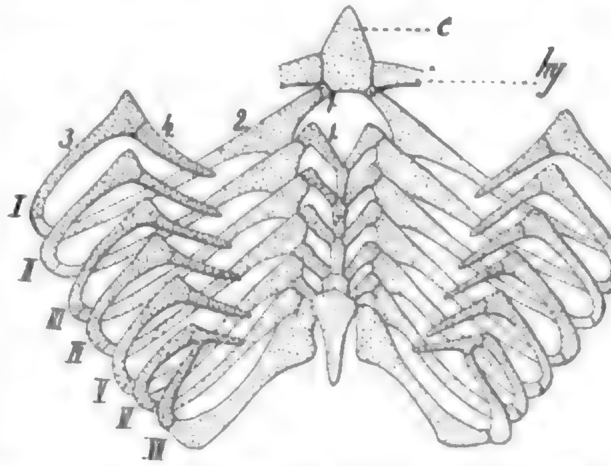


Fig. 7. Kiemenskelett von Heptanchus. Nach Gegenbaur 1872. c Copula, hy Hyoid, I bis VII Kiemenbögen, 1 bis 4 Glieder der Kiemenbögen.

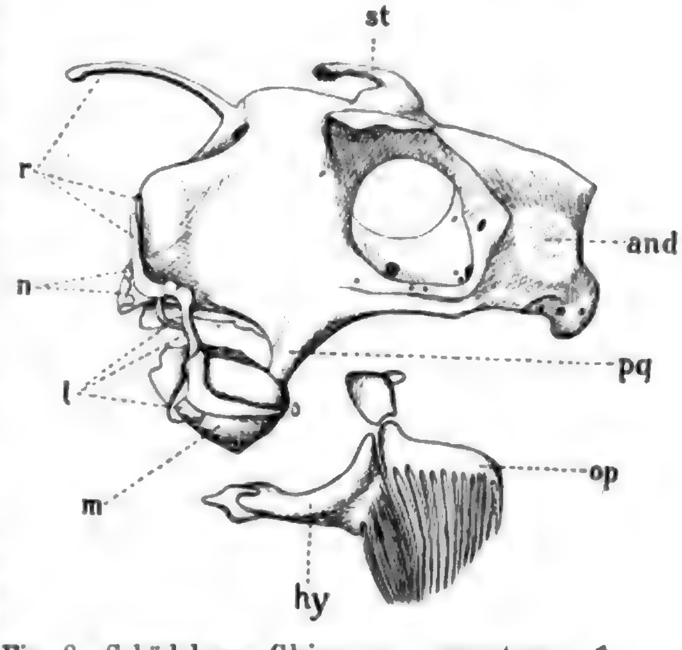


Fig. 8. Schädel von Chimaera monstrosa ♂. (Nach Hubrecht 1876). r Rostral-, n Nasal-, l Labialknorpel, m Mandibel, pq Palatoquadratum, and Labyrinthregion, hy strahlentragendes Hauptstück des Zungenbogens; op Kiemendeckelplatte, st Stirnfortsatz.

Digitized by Google

durchschnittlich zahlreicher als bei Haien (28 bis 30 bei Rhynchobatus an einem Bogen, bei den Haien maximal etwa 20); bei den Holocephalen sind sie verkümmert; sie dienen den Kiemensepten (s. u.) zur Stütze. Am Hyoidbogen bilden sich durch basale Verwachsung der Radien häufig sogenannte Radienplatten (Fig. 6); dieselben dienen bei den Holocephalen dem „Kiemendeckel" (der vielleicht eher der Branchiostegalmembran höherer Fische entspricht) zur Stütze (Fig. 8 op.). Besondere dorsale und ventrale Knorpelspangen, distal von den eigentlichen Visceralbögen gelegen und jeweils die Kiemenspalte zwischen ihnen oben und unten überbrückend, werden als „äußere Kiemenbögen" oder Extrabranchialia bezeichnet; sie sind vielleicht auf modifizierte Kiemenstrahlen zurückzuführen (Dohrn u. a.)

Die Wirbel (Fig. 9, w) sind trommel- bezw. sanduhrförmige, knorpelige, aber teilweise verkalkte Gebilde; sie entstehen vorwiegend

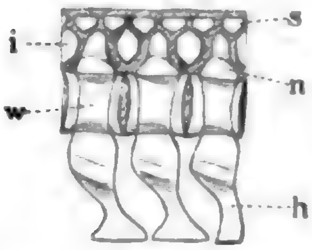
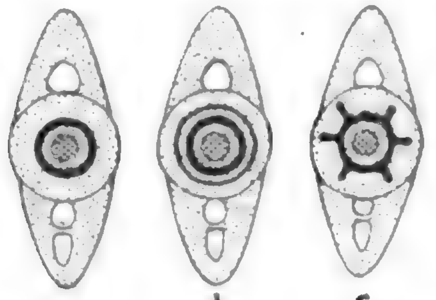


Fig. 9. Schwanzwirbel von Pristiurus. Nach Hasse 1882 (schematisiert); w Wirbelkörper, n Neural-, h Hämalbogen, i Intercalare, s Schlußstück.

durch Einwucherung mesodermalen Gewebes in die innere Chordascheide („Chorda-Centra", Gadow). Die primäre Verkalkungszone hat die Form eines Doppelkegels, dessen Spitze in der Wirbelmitte liegt; auf dem Querschnitt erscheint sie als einfacher, nahe der Chorda gelegener Ring (Cyclospondyli, Hasse); sekundär bilden sich weitere äußere Mäntel von verkalktem Knorpel (Tectospondyli), oder dieser tritt in radiären Lamellen auf (Asterospondyli, vgl. Fig. 10). Dorsal erheben sich von den Centra paarige, das Rückenmark seitlich



a b c

Fig. 10. Schematische Querschnitte von Haifischwirbeln. Nach Hasse 1879. Verkalkungszone (schwarz) bei a in Form eines Doppelkegels (Cyclospondylus), bei b mit hinzutretenden äußern Kalkschichten (Tectospondylus), bei c mit radialen Lamellen (Asterospondylus).

umgreifende obere oder Neuralbögen, in der Schwanzregion ventral entsprechende (die Caudalarterie und -vene einschließende) untere oder Haemalbögen (Fig. 9). Zwischen je 2 Bögen schieben sich paarige Intercalarstücke ein, zwischen die paarigen Bogenteile fügen sich unpaare Schlußstücke (Neural- bezw. Haemaldornen). Gewöhnlich sitzen die Bogenstücke der verknorpelten Chordascheide getrennt auf, in gewissen Fällen jedoch (und zwar, nach Regan, bei denjenigen Haien besonders, bei denen die sekundären Verkalkungszonen schwach sind oder fehlen), verbinden sich die oberen und unteren Bogenbasen miteinander, eine äußere Knorpellage rings um die Chordascheide bildend; dies Verhalten vermittelt den bei Teleostomen begegnenden Befund. Im Rumpf erscheinen an Stelle der Haemalbögen seitliche Wirbelfortsätze (Parapophysen), denen sich die proximalen Enden der Rippen — („obere", die sich in das horizontale Seitenmuskelseptum erstrecken, denen der Amphibien und Amnioten homolog) — anlegen. Während in der Rumpfregion bei den Plagiostomen auf jedes Myomer ein Wirbelzentrum mit je einem Paar von Bogen- und Intercalarstücken entfällt, kommen in der Schwanzwirbelsäule je zwei Wirbel auf ein Myomer (Diplospondylie); in diesem Falle tragen nur ein oberes Bogen- und Intercalarstück um das andere die Löcher bezw. Kerben zum Durchtritt der Spinalnerven. Eine weitere Zunahme der Wirbelzahl in jedem Myomer läßt sich in der Schwanzregion der Holocephalen aus dem Verhalten der Spinalnerven zu den Bögen nachweisen (Polyspondylie).

Der Schultergürtel (Fig. 11) und die (median vereinigten) Beckenstücke sind wenig gegliederte, mit der Wirbelsäule (außer bei

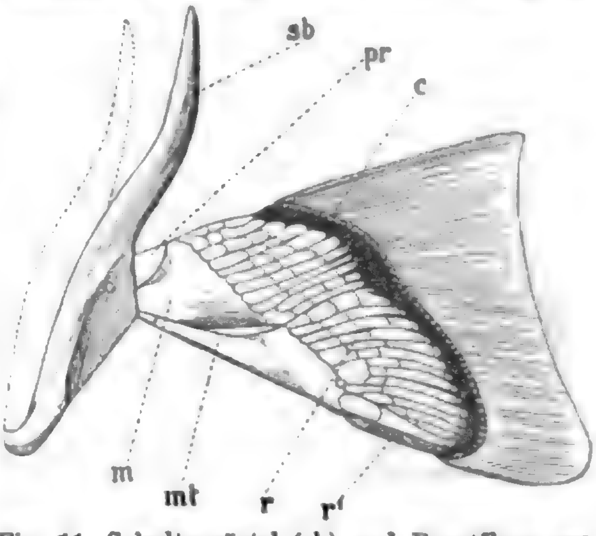


Fig. 11. Schultergürtel (sb) und Brustflosse von Heptanchus. Nach Wiedersheim, Gliedmaßenskelett der Wirbeltiere 1892. pr, m, mt Pro-, Meso- und Metapterygium, r, r' Radien, c Ceratotrichien (durchschnitten).

Digitized by Google

den Rochen) nicht verbundene Knorpel. Dem ersteren schließen sich beweglich meist 3 den proximalen Teil der Extremität bildende Knorpel — Pro-, Meso- und Metapterygium — an, diesen distalwärts eine größere Zahl knorpeliger, gewöhnlich 3-gliedriger Radialia; zum Teil treten diese auch auf die Außenseite des Metapterygiums über (vgl. Fig. 11, r^1), womit die Flosse sich dem biserialen, von gewissen Theoretikern für primitiv erachteten Bau („Archipterygium“) nähert (vgl. unten S. 1070). Bei den Rochen legen sich das Pro- und das Metapterygium, nach vorn und hinten auseinandergespreizt, den Körperseiten an; die Radien sind überaus zahlreich, vielgliedrig, am Ende gegabelt. Die distale Flossenfläche wird von sehr zahlreichen, die Knorpelradien beiderseits überlagernden sogenannten Hornfäden oder Ceratotrichia gestützt (histiochemisch stehen dieselben dem elastischen Gewebe nahe). — Nicht sehr abweichend verhalten sich die unpaaren Flossen; die meist 3-teiligen Radien (deren proximale Glieder oft verschmelzen), erstrecken sich weit (besonders bei Holocephalen) in die freie Flosse hinein. — Die Männchen der Selachier besitzen ein hauptsächlich aus abgegliederten Teilen der Bauchflossen gebildetes Copulationsorgan.

Das Schwanzende ist meist zur Horizontalebene unsymmetrisch gebaut, heterocerk (vgl. Fig. 1, b); in den größeren oberen Schwanzlappen setzt sich das Ende der Wirbelsäule fort. Diese Einrichtung ist am meisten bei Fischen mit unterständigem Maul (z. B. auch bei den Stören) ausgebildet, denen die Bewegung des oberen Schwanzlappens wohl den Uebergang in eine halbaufgerichtete Stellung erleichtert. Die Holocephalen haben ein einfach spitz zulaufendes (diphycerkes) Schwanzende; ihre Wirbelsäule ist acentrisch, aus Knorpelbögen, die den durch Kalkringe verstärkten Scheiden der uneingeschränkten Chorda aufsitzen, gebildet.

Bei den Teleosteern treten zum embryonalen Knorpelskelett Knochenbildungen, teils im unmittelbaren Anschluß an den Knorpel als „primäre“ oder Ersatzknochen oder ohne solchen, im Bindegewebe entstehend und meist mehr oberflächliche Lage einnehmend, als „sekundäre“, Haut- oder Deckknochen; die Grenzen von beiderlei Bildungen sind jedoch nicht völlig scharf; einzelne Knochen entstehen aus der Verschmelzung dermaler und perichondraler Anlagen, Deckknochen können sich dem Knorpel unvermittelt anlagern und bei topographisch als primäre anzusprechenden Knochen kann die knorpelige Grundlage in der Embryogenese unterdrückt sein. Zur ersten Kategorie gehören am Schädel (vgl. Fig. 12 u. 13) die das Hinterhauptloch umgebenden Occipitalia (Basi- und Supraoccipitale, 2 Exoccipitalia); die das Labyrinth umschließenden Otica (Sphenoticum, Pteroticum — diese beiden oft durch Deckknochen: Postfrontale bezw. Squamosum vertreten — Epi-, Pro- und Opisthoticum); das Basiphenoid und Alisphenoide; Exethmoide [Praefrontalia], Mesethmoid, Metapterygoid (mt pt). Als Deckknochen gelten die das Schädeldach bildenden paarigen Frontalia (fr), die ursprünglich ebenfalls mit medianer Naht zusammenstoßenden, bei den Acanthopterygiern aber meist durch das Supraoccipitale geschiedenen, bisweilen auch mit den Frontalia vereinigten oder ganz unterdrückten Parietalia (p), die Nasalia,

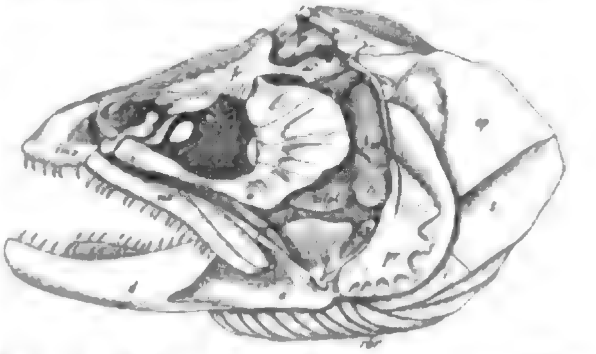


Fig. 12. Schädel von Salmo trutta. Nach Agassiz u. Vogt. Verweisungen im Text.

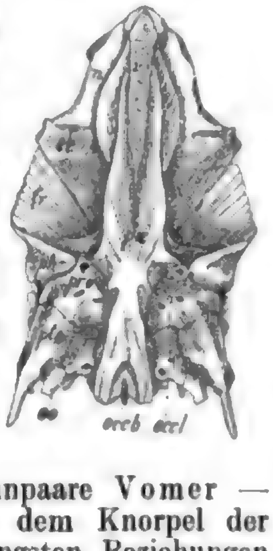


Fig. 13. Unterfläche des Schädels von Salmo trutta. Nach Agassiz u. Vogt. n Nasale, eė Präfrontale, v Vomer, pa Parasphenoid, sph, pro, pto, oo Sphen-, Pro-, Pter- und Opisthoticum, occ b Basioccipitale, occl Exoccipitale.

der stets (sekundär) unpaare Vomer — (der allerdings oft mit dem Knorpel der Ethmoidregion in die engsten Beziehungen tritt) — und das die Schädelbasis bekleidende langgestreckte Parasphenoid; ferner das Ecto- und Endopterygoid (pt), flache, zum Teil die Orbita bedeckende Sub- bezw. Praeorbitalia (o) und die Knochen des Kiemendeckels. Von letzteren ist das Operculare (op) meist gelenkig mit dem Hyomandibulare verbunden; das Praeoperculum (pr) überlagert das letztere und das Quadratum und kann gelegentlich

Digitized by Google

mit ihnen verschmelzen (Siluriden); es ist als „Schleimkanalknochen" von Wichtigkeit. Das Interoperculum (i) ist sehr regelmäßig mit dem Articulare des Unterkiefers ligamentös verbunden; das Suboperculum (s) fehlt bisweilen (Siluriden). Das Gelenk des Operculare kann Knorpelreste enthalten (Syngnathiden). „Hyostylie" ist bei Teleosteern die Regel; meist ist das stabförmige Hyomandibulare (hm) mit dem Sphen- und Pteroticum gelenkig verbunden; bei den Loricariiden aber bildet es eine breite unbewegliche Platte, bei Diodon verwächst es mit dem Schädel; die feste Verbindung mit dem Quadratum (q) vermittelt gewöhnlich ein Symplecticum (sy; es fehlt den Siluriden und Muraeniden). Diese Knochen des Kiefersuspensoriums, das vor dem Quadratum gelegene Metapterygoid (mt pt), die Palatina, (die vorn mit der Ethmoidalregion in Gelenkverbindung treten), der Hyoidbogen und die Kiemenbögen entstehen auf knorpeliger Grundlage bezw. umschließen Knorpelstücke. Von den Knochen des Unterkiefers ist das Articulare (a) ein Ersatz- oder ein Mischknochen, das Dentale (d), und das Angulare, stehen zum (Meckelschen) Knorpel in weniger enger Beziehung; Ober -und Zwischenkiefer, Maxillaria (mx) und Intermaxillaria (imx) entbehren knorpeliger Teile; bei den Physostomen bilden sie meist gemeinsam den oberen Mundrand, bei den Acanthopterygiern u. a. liegen sie meist schräg hintereinander (Fig. 55); das Maxillare nimmt dann an der Begrenzung des Mundes oft nicht mehr teil und verliert die Bezahnung; bei den Plectognathen verschmelzen Ober- und Zwischenkiefer mehr oder minder fest miteinander (Fig. 56). Auf die Beziehungen des knorpeligen Tentakelskeletts (bei Siluriden u. a.) zu den Labialknorpeln der Elasmobranchier u. a. kann nicht eingegangen werden (vgl. Pollard, Zool. Jahrb. Abt. f. Anat. Bd. 8. 1895). Der Hyoid- oder Hyalbogen (Zungenbein) umfaßt meist vier Glieder (Styl-, Epi-, Cerato-, Hypohyale), von denen sich das kurze oberste stets zwischen dem Hyomandibulare und dem Symplecticum anheftet; das Hypohyale besteht oft aus 2 nebeneinander liegenden Stücken (Fig. 14). Dazu kommt ein medianes copulaartiges Stück (Basi- oder Glossohyale), meist schließt sich den ventral vereinigten Enden nach hinten eine Sehnenverknöcherung (Urohyale, Fig. 55u) an; die mittleren Glieder sind mit Knochenstäben, Radii branchiostegi (rbr), besetzt, welche die den Kiemendeckel ventralwärts vervollständigende Kiemenhaut verstärken: sie entsprechen offenbar den Septalradien der Elasmobranchier. Dem konvexen Rand der mittleren der 4 Kiemenbogenglieder (Pharyngo-, Epi-, Cerato- und Hypobranchialia) sind knorpelig-knöcherne Stäbchen, Kiemengräten, zweizeilig lose aufgesetzt (bisweilen an der Basis fortlaufend durch Knorpel verbunden); sie fehlen dem letzten (V.) Bogen, der nur aus jederseits einem ungegliederten Stück („untere Schlundknochen") besteht. Ein wahrscheinlich als Rest eines Kiemenbogens zwischen dem Hyoid- und dem I. (normalen) Kiemenbogen zu deutendes Skelettstück kommt bei Loricariiden vor (Weyenbergh; Rauther, Zool. Jahrb. Abt. f. Anat. Vol. 31, 1911). Die Innenfläche der Bögen trägt meist lose angebrachte stabförmige

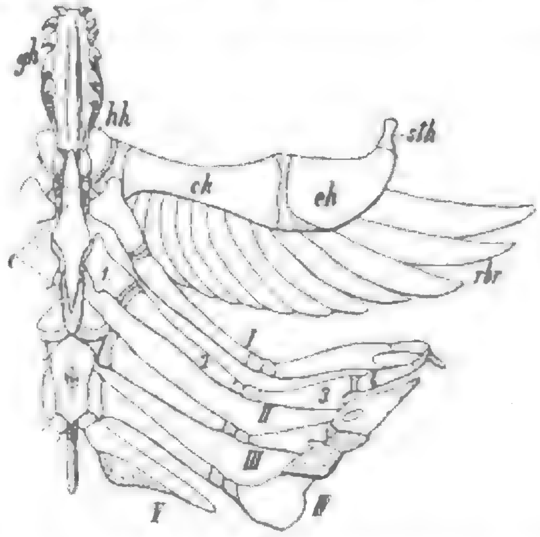


Fig. 14. Rechte Hälfte des Kiemenkorbs von Salmo trutta. Nach Agassiz u. Vogt. c Copulae, gh Glossohyale, hh, ch, eh, sth Hypo-, Cerato-, Epi- und Stylhyale; I—IV Kiemenbögen, V untere Schlundknochen, 1 Hypo-, 2 Cerato-, 3 Epi-, 4 Pharyngobranchiale.

Knochenbildungen (Siebfortsätze, siehe S. 1095) bezw. echte Zähnchen, die auf den unteren und den oberen Schlundknochen (Pharyngobranchialia) sich bedeutend entfalten können (über die Bezahnung vgl. im übrigen S. 1077).

Die Wirbel, stets außerhalb der Chordascheiden entstehend („arch-centra", Gadow), sind sanduhrförmig, amphicöl; die Chorda wird intravertebral mehr oder minder vollständig verdrängt. Obere und untere Bögen entstehen von knorpeligen Anlagen aus, verschmelzen mit den Dornfortsätzen meist zu einheitlichen Gebilden; Intercalaria sind nicht gesondert. Zur wechselseitigen Verbindung der Wirbel dienen oft paarige Gelenkfortsätze (Zygapophysen). Die Rumpfwirbel tragen starke Querfortsätze (Parapophysen), denen sich meist untere Rippen (Pleuralbögen, zwischen Bauchfell und Muskulatur verlaufend) anlegen. Die oberen Rippen finden sich nur in Rudimenten

Digitized by Google

(Salmo, Clupea); sie werden vertreten durch die mittleren der sogenannten Fleischgräten, die in 3 Paaren vorkommen können (Fig. 15). Bei einigen gepanzerten Formen

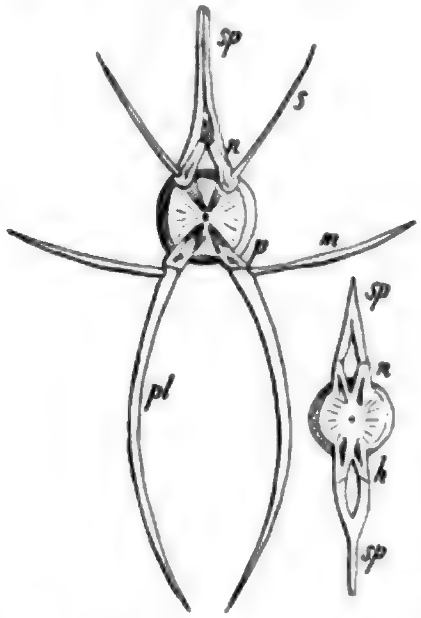


Fig. 15. Rumpf- und Schwanzwirbel vom Lachs, am Ursprung der Bögen (n, h) durchschnitten. Nach Bruch 1875. sp Dornfortsätze, p Parapophysen, pl (untere) Rippen, s, m obere und mittlere Fleischgräten.

verkümmern die Rippen (vgl. Fig. 5, Syngnathus, wo mächtige Querfortsätze den Seitenschildern eine Stütze bieten). Auch bei den Teleosteern ist das ungegliederte Ende der Wirbelsäule (Urostyl) bezw. das Ende der Chorda meist schräg aufwärts gebogen, das Skelett der Schwanzflosse also, trotz äußerer Symmetrie dieser (Homocerkie, Fig. 1, c bis e), unsymmetrisch; der untere Schwanzlappen wird dann von vergrößerten, zu einer Knochenplatte (Hypurale) mehr oder minder völlig verschmolzenen Haemaldornen der letzten Wirbel getragen (Fig. 16, hu). Häufig sind infolge von Verkümmerung des

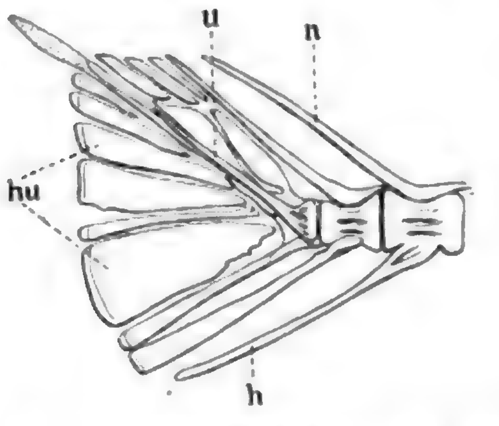


Fig. 16. Schwanzflossenskelett von Clupea pilchardus. Nach Whitehouse.

Wirbelsäulenendes (sekundär) symmetrische Schwanzflossen (Gephyrocerkie, Fig. 17).

Den Hauptteil des Schultergürtels (Fig. 18) bilden zwei bogenförmige medioventral verbundene Deckknochen, Cleithra (Gegenbaur); oft gewinnen sie durch andere Deckknochen (Supracleithrale, Posttemporale) Stützpunkte am Schädel (Pteroticum, Epioticum); bisweilen entspringt vom Cleithrum nach innen und hinten ein säbelförmiges „Postcoracoid" (Postclavicula, Fig. 56, pcl). Im primären knorpeligen Schulterbogen entstehen zwei der Innen- und Hinterfläche des Cleithrum fest ansitzende, als Scapula und Coracoid gedeutete Verknöcherungen, zu denen bei den Physostomen ein drittes bogenförmiges Stück kommt, das „Mesocoracoid". Reduktionen

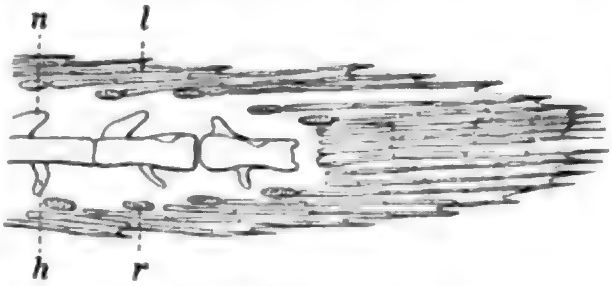


Fig. 17. Schwanzflossenskelett von Fierasfer. Nach Emery. n Neural-, h Hämalbögen, r Flossenträger, l Lepidotrichien, u Urostyl, hu Hypuralia.

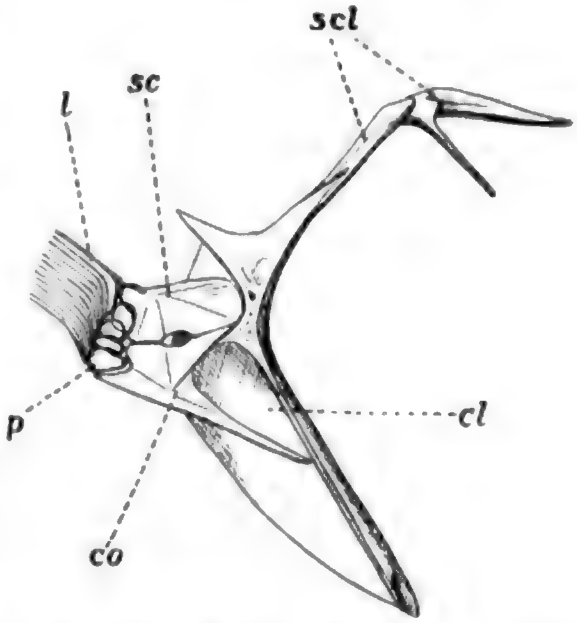


Fig. 18. Schultergürtel von Merluccius, mediale Seite; sc Scapula, co Coracoid, cl Cleithrum, scl Supracleithra, p Radialia, l Knochenstrahlen.

bezw. Verschmelzungen sind häufig. Bei den Siluroiden verbinden sich die Cleithra medioventral durch eine zackige Naht, ebenso die ihnen dicht anliegenden Coracoide. Distal schließen sich meist 5 Radialia an,

Digitized by Google

(bei **Muraenolepis** 10, bei **Gymnotus** und **Anguilla** 8, bei **Lophius** nur 2 sehr verlängerte). Die freie Flosse wird hauptsächlich von Knochenstrahlen gestützt; ihre gelenkige Beweglichkeit beruht auf der Ausbildung der distalen Radialstücke (s. u.). Die Beckenknochen sind ungegliederte Knochenstücke, entweder frei der Muskulatur eingelagert oder am Schultergürtel befestigt (Fig. 56 p).

Das Skelett der unpaaren Flossen besteht aus 2-, seltener (bei Muraeniden, Osteoglossiden, Esociden u. a.) 3-gliederigen, bisweilen auch ungegliederten Flossenträgern oder Radialia. Meist sind die verknöcherten proximalen Stücke mit den Dornfortsätzen verbunden; die distalen bilden kugelige Gelenkknorpel, denen die knöchernen Flossenstrahlen, **Lepidotrichia**, mit basal auseinanderweichenden Hälften aufsitzen (Fig. 22c). Hornfäden erhalten sich nur am Rande der Flossen (einwärts von den Flossenstrahlhälften) und in der Fettflosse der Salmoniden. Die Radialia treten nie in die Flosse selbst ein, sondern liegen tief im vertikalen Septum der Stammmuskulatur. — Die Knochenstrahlen sind hohle, je ein Paar median verbundene Rinnen darstellende Stäbe, aus einem Stück oder quer gegliedert, erstere entweder dünn und biegsam oder kräftiger und mehr oder minder starr (Fig. 1, d D); letztere entweder einfach oder distal mehrfach längsgespalten (Fig. 1, d D¹, C, A); „wahre Stacheln" sind nach Kner (Sitzungsber. Akad. Wien 1860) „ungegliederte und ungeteilte Strahlen, deren Achse hohl ist"; die stachelartigen Strahlen der Physostomen lassen gewöhnlich ihre Entstehung aus Gliederstrahlen noch deutlich erkennen.

Ueber die wichtigsten Modifikationen des Skeletts der Teleosteer vgl. den systematischen Teil (S. 1097).

Bei den **Chondrostei** (Fig. 19) treten an dem in ein ansehnliches Rostrum verlängerten knorpeligen Schädel, sowie im Visceralskelett, nur wenige und schwache Verknöcherungen auf; die zahlreichen oberflächlichen Schädeldeckknochen sind nicht durchweg mit denen der Teleosteer zu identifizieren. Der vordere Mundrand wird hauptsächlich von den vorn verwachsenen Palatoquadratknorpeln (an denen ein knöchernes Quadratum, Pterygoid und Palatinum auftreten) gebildet; schwache Maxillaria sind vorhanden, Intermaxillaria fehlen. Ein starkes Hyomandibulare, von dem sich distal ein unverknöchertes Symplecticum absondert, trägt den Kiefergaumenapparat, auf der Hinterseite ein Operculare. Das Achsenskelett besteht aus der **zellenlosen** Chordascheide aufsitzenden oberen und unteren Bogen- und Intercalarstücken; Neuralbögen, -dornen und Rippen sind teilweise verknöchert; das Hinterende ist stark heterocerk (Fig. 20). Am knorpeligen Schulter-

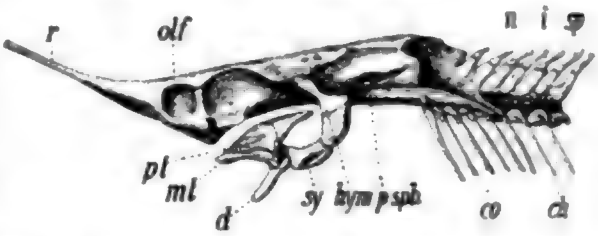


Fig. 19. Primordialcranium, anschließende Wirbel und Kieferapparat von **Acipenser ruthenus**. Nach J. Müller 1834. r Rostrum, olf Kapsel des Geruchsorgans, mt Maxillare, d Dentale, pt Pterygoid, sy Symplecticum, hy m Hyomandibulare, p sph Parasphenoid, co Rippen, ch Chorda, n Neurapophysen (die vordersten mit dem Cranium verwachsen, ein einheitliches Knorpelrohr um die Chorda bildend), i Intercalaria, sp Dornfortsätze.

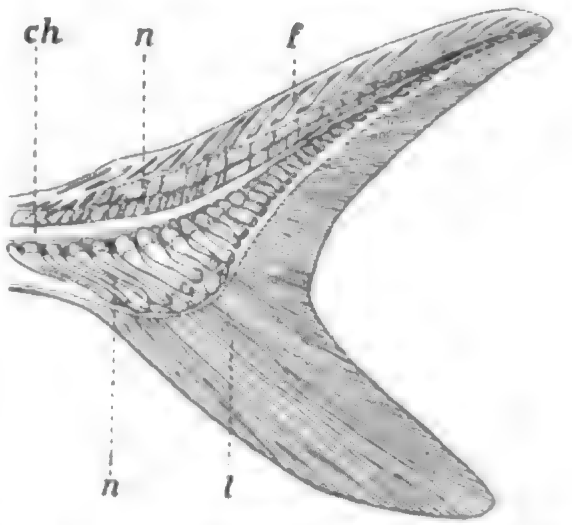


Fig. 20. Schwanzskelett von **Polyodon**. Nach **Whitehouse**, Proc. Zool. Soc. 1910. ch Chorda, n Neural-, h Haemalbögen, l Lepidotrichien; diese und die Fulcra (f) proximal zurückgeschnitten.

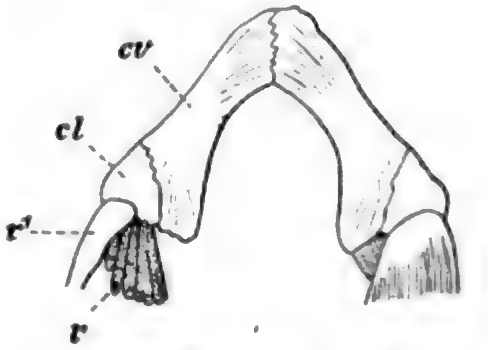
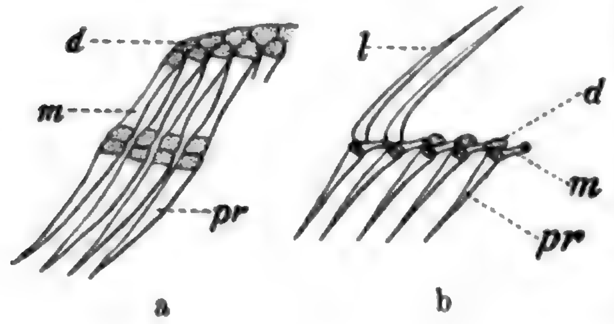


Fig. 21. Schultergürtel von **Acipenser**. Nach **Gegenbaur** 1895. cv Clavicula, cl Cleithrum, r knorpelige Radien, r' knöcherner Randstrahl.

bogen treten zwei gesonderte Deckknochen (Fig. 21) auf, **Claviculae und Cleithra**; erstere

Digitized by Google

bewirken die mediane, Supracleithra die Verbindung mit dem Schädel. In den paarigen Flossen ist die Zahl der Radien gering, ein schwaches Metapterygium ist ausgebildet; die freie Flosse ist von Lepidotrichien gestützt, der vordere Randstrahl mächtig verstärkt. Bezüglich der Radien in den unpaaren Flossen vgl. Figur 22a.



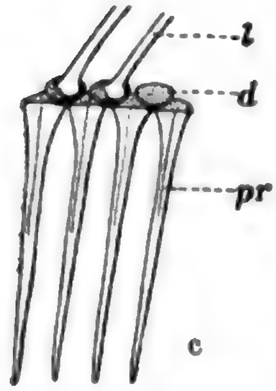


Fig. 22. Radien der Rückenflosse a) von Polyodon folium, b) von Amia calva, c) von Pleuronectes platessa. Nach Bridge 1896. d, m, pr distales, mittleres und proximales Trägerstück, l Knochenstrahlen (Lepidotrichien).

Amia und Lepidosteus weisen am Schädel Ersatz- und Deckknochen in annähernd gleichen Zahl- und Lageverhältnissen wie die Teleosteer auf. In der Kehlregion von Amia findet sich außer platten Kiemenhautstrahlen eine unpaare Kehlplatte. Bei Lepidosteus ist die Schnauze sehr verlängert, das Maxillare mehrfach geteilt; wie bei Amia läßt das Palatinum deutlich die Zusammensetzung aus einem dermalen und einem primären Anteil (Autopalatinum) erkennen (Fig. 26). Die Wirbel lassen bei Amia streckenweise ihre Doppelwertigkeit äußerlich deutlich erkennen (bogentragende Praecentra und Postcentra); bei Lepidosteus kommt es, einzig unter den Fischen, zur Ausbildung opisthocoeler Wirbel ohne Chordarest; Intercalarknorpel finden sich aber auch hier noch. Im Schulterbogen sind die primären Verknöcherungen schwach oder fehlen (Amia); in den Brustflossen treten noch einige Radien zu einem Metapterygoid in Beziehung. Die Flossenträger (Fig. 22b) bewahren die Dreiteilung, verhalten sich topographisch aber wie bei Teleosteern.

Bei den Polypteriden persistiert das Knorpelcranium in größerem Umfange; außer enchondralen Verknöcherungen treten eine große Zahl (zum Teil sehr atypischer) Deckknochen daran auf (Fig. 23). Der Kieferapparat ist vollständig, das Gelenk hyostyl, doch ist die Beziehung des Hyomandibulare zum Quadratum wenig innig und zur Befestigung des Gaumenapparates am Schädel tragen die Palatina und Pterygoide wesentlich bei; ein Symplecticum fehlt. Ein Lippenknorpel liegt am oberen Rande des Unterkiefers. Die Kehlregion bedeckt 1 Paar Kehlplatten; 4 knöcherne Kiemenbögen sind vorhanden, 3 Kiemendeckelstücke (kein Interoperculum). Die knöchernen amphicoelen Wirbel tragen außer den Pleuralbögen auch echte (knorpelig präformierte) obere Rippen. Am Schulterbogen sind Coracoid und Scapula unbedeutend, von Deckknochen außer Cleithra und Supracleithra Claviculae ausgebildet (Fig. 23 cv). In der

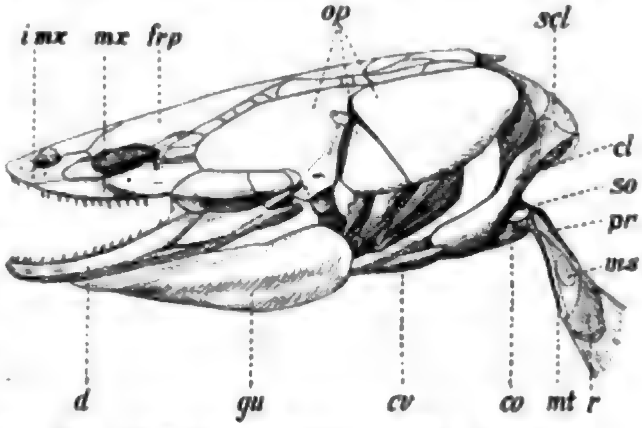


Fig. 23. Schädel und Schultergürtel von Polypterus. Nach J. Müller 1844. mx Maxillare, imx Intermaxillare, fr p Frontoparietale, d Dentale, gu Kehlplatte, op Operculare, Prä- und Suboperculare, cv Clavicula, cl Cleithrum, scl Postclavicula, co Coracoid, sc Scapula, pr, ms, mt Pro-, Meso-, Metapterygoid, r Radien; die Knochenstrahlen der Brustflosse abgeschnitten.

Basis der Brustflosse treten drei Verknöcherungen auf, deren proximale Enden mit einem knorpeligen Zapfen des Schultergürtels gelenkig verbunden sind, und die wohl einem Pro-, Meso- und Metapterygoid entsprechen. Die Radialia sind sehr zahlreich, distal wird die Flosse von noch zahlreicheren Knochenstrahlen gestützt. Die Lepidotrichien der Rückenflösschen sind an ungegliederten Stacheln befestigt (Fig. 54).

Bei den Dipnoern (Fig. 24) erhält sich das Knorpelcranium in beträchtlichem Umfange; Ersatzknochen sind spärlich (Exoccipitalia). Es herrscht Autostylie: das Hyomandibulare ist rudimentär. Der Mangel der Ober- und Zwischenkiefer und des Dentale, das Auftreten von Lippenknorpeln (?) gemahnt an die niedern Fische; große Pterygopalatina bezw. Splenialia (auf der Innenfläche der Unterkieferknorpel) tragen die Zahnplatten (s. u.). Die Visceralbögen,

Digitized by Google

mit Ausnahme des Hyoid, sind schwach, unverknöchert, nicht gegliedert und strahlenlos; bemerkenswert ist wiederum ein Bogen vor der 1. Kiemenspalte (I[1]), der ventral mit dem gewöhnlich vordersten Kiemenbogen (I) verwachsen ist, ähnlich wie der IV. mit dem V.; man hat ihn als ein Verschmelzungsprodukt der die Vorderwand der 1. Kiemenspalte besetzenden Siebfortsätze gedeutet (K. Fürbringer 1904), doch kann die Ansicht, daß es sich um das Rudiment eines echten Kiemenbogens handle, nicht für widerlegt gelten.

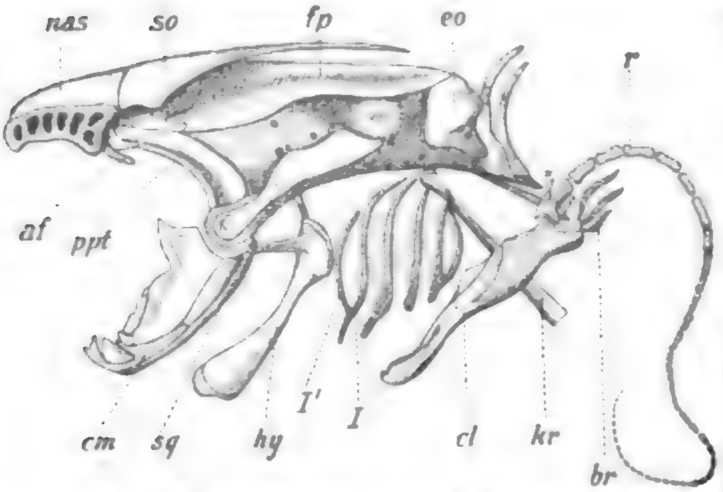


Fig. 24. Kopfskelett und Vorderextremität von Protopterus. Nach Wiedersheim 1880. nas Nasale, so Supraorbitale, fp Frontoparietale, eo Exoccipitale, p pt Palatopterygoid, sq Squamosum, af Antorbitalfortsatz, cm Meckelscher Knorpel, hy Hyoid, I erster Kiemenbogen, br äußere Kiemen, r Hauptstrahl der Brustflosse (** Reste von Nebenstrahlen), kr Kopfrippe, cl Clavicula; die Opercularia sind entfernt.

Copulae fehlen. Es sind zwei Kiemendeckelknochen vorhanden, von denen der obere als Operculare, der untere, mit dem Unterkiefer ligamentös verbundene, als Interoperculum gedeutet wird; beide sind distal von Knorpelstückchen unterlagert, die möglicherweise Hyoidradien repräsentieren. Die Wirbelsäule ist acentrisch, doch findet Invasion mesodermaler Zellen in die Chordascheiden statt; das Hinterende ist gerade, fadenförmig, knorpelig, im ganzen ähnlich wie bei Holocephalen, doch scheint auch hier nicht die Diphycerkie, sondern Heterocerkie der ursprüngliche Zustand (Parker, Dean); zwischen den Bögen finden sich kleine Intercalaria. Nur untere Rippen (Pleuralbögen) sind vorhanden. Am Schultergürtel ist das Vorhandensein von Claviculae zu vermerken. Eigenartig verhalten sich die paarigen Flossen, die einen gegliederten Hauptstrahl, bei Ceratodus mit biserialen Nebenstrahlen, enthalten. In die unpaaren Flossen ragen endoskeletale Radien weit hinein, distal treten eigentümliche, zwischen Cerato- und Lepidotrichien vermittelnde Camptotrichien (Goodrich) hinzu.

Als gemeinsame osteologische Charaktere, welche die Ganoiden mit Einschluß der Dipnoer von den Teleosteern scheiden und zugleich Beziehungen zu den Amphibien andeuten, verdienen noch vermerkt zu werden der Mangel des Supraoccipitale, die Paarigkeit des (bei Dipnoern rudimentären) Vomer, das Vorhandensein von Splenialia am Unterkiefer; neben bestehender Hyostylie des Kiefergaumenapparates ist meist (außer bei den Stören, wo der letztere offenbar verkümmert ist) eine Pterygoidverbindung mit dem Schädel von Bedeutung (Fig. 26 mp), die bei Dipnoern auch auf den Quadratteil jenes sich ausdehnt.

Das Skelett der Cyclostomen trägt den Stempel einer rudimentären Bildung, wenngleich ihm Teile zukommen, die bei den übrigen Fischen fehlen oder wenig entwickelt sind. Die Chorda bleibt uneingeschränkt, mit zellenlosen Scheiden; sie trägt unvollkommene obere und untere Bögen, je zwei auf ein Segment (Petromyzon, Fig. 25n); bei Myxine fehlen die Bögen. Die Schädelkapsel ist knorpelig, bei Petromyzon oben, bei Myxine auch seitlich häutig; sie schließt hinten mit der Labyrinthregion ab, der IX. und X. Gehirnnerv

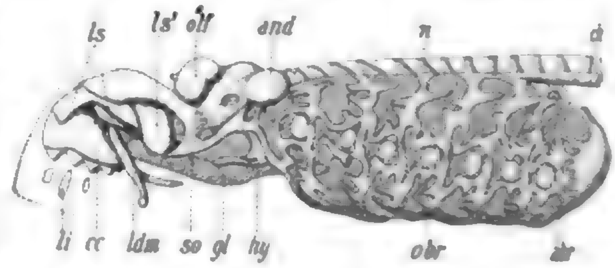


Fig. 25. Kopf- und Kiemenskelett von Petromyzon. Nach W. K. Parker 1883. olf Nasenkapsel, aud Labyrinthkapsel, so Suborbitalbogen, hy Hyoidbogen, ls ls' obere Lippenknorpel (ls' = Meckelscher Knorpel?), li untere Lippenknorpel, cc Ringknorpel (mit Hornzähnen), ldm Anhang desselben, gl Zungenknorpel, abr Kiemenkorb, obr äußere Kiemenöffnungen, ch Chorda, n Neuralbögen.

treten hinter ihr aus. Geruchsorgan und Labyrinth haben knorpelige Kapseln; Analoga des Hyoids, des Palatoquadratum (so), des Meckelschen Knorpels usw. sind zu identifizieren versucht worden (Huxley u. a.); mehrere „Labialknorpel" stützen die Mundränder, ein starker gegliederter Knorpelbalken (Basihyale?) die Zunge. Die Kiemen haben bei Petromyzon ein Gerüst aus ungegliederten längsverbundenen Knorpelspangen, die lateralwärts von den Gefäßen liegen und über deren Homologie mit den Kiemenbögen oder den Außenknorpeln der

Digitized by Google

Selachier noch Zweifel bestehen; ein schalenförmiger Knorpel am Ende des „Kiemenkorbs" umgibt das Pericard; bei Myxinoiden bestehen vom Kiemenskelett nur geringe Reste. Die Flossen werden durch Knorpelstrahlen (= Neuraldornen?) gestützt, deren Basen bei Myxine am Schwanzende zu einer vertikalen Platte verschmelzen.

Als von besonders hohem taxonomischen Wert erweist sich das Verhalten des Kieferapparats zum Schädel und dem nächstfolgenden „Visceralbogen"; nach der oben gegebenen Darstellung würden in dieser Hinsicht die Teleosteer, Holosteer, Chondrosteer und Polypteriden mit den meisten Plagiostomen fast völlige Uebereinstimmung zeigen, indem bei allen das proximalste Glied des Hyoidbogens zum „Kieferstiel" wird; nur die Holocephalen und Dipnoer, bei denen der Kieferstiel verkümmert wäre, würden abseits stehen. Demgegenüber ist aber nicht zu verkennen, daß das sogenannte Hyomandibulare vieler haiartiger Plagiostomen weder in seiner ligamentösen Befestigung am ventralen Segment des „Mandibularbogens", noch in seiner Gelenkung am Schädel (hinter der Ohrkapsel) mit dem Hyomandibulare der Teleostomen genau übereinstimmt; dem Pteroticumgelenk der letzteren entspricht eher die Verbindungsstelle des Palatoquadratum mit dem Postorbitalfortsatz des Craniums bei den amphistylen Notidaniden; in dem funktionierenden „Kieferstiel" der hyostylen Haie sieht daher Pollard (Anatom. Anz., Vol. **10**, 1894) das Stylhyale, das Hyomandibulare sucht er in dem dorsalen postorbitalen Fortsatz des Palatoquadratum (von dem sich auch bei nicht amphistylen Formen noch Reste erhalten, s. Fig. 6). Ein solches Aufgehen des Hyomandibulare in das Palatoquadratum (also sekundäre Autostylie) könnte etwa bei Dipnoern und Holocephalen in Frage kommen, wo zugleich der ganze Palatoquadratkomplex mit dem Schädel verschmilzt und das Spritzloch verdrängt wird; allerdings meint Schauinsland (Zoologica 1903) bei den letzteren das Hyomandibulare in dem kräftigen Epihyale zu erkennen und bei den ersteren verschmilzt es nach Krawetz (Bull. Soc. Imp. Nat. Moscou 1910) mit der Gehörkapsel. Die Homologisierung des Postorbitalfortsatzes der Notidaniden mit dem Hyomandibulare der Teleostomen verbietet sich schon darum, weil das Spritzloch hinter jenem, aber vor diesem (bei Chondrosteern und Polypteriden) gelegen ist; jener entspricht topographisch am ehesten der bei den Teleostomen vom Metapterygoid eingenommenen Region; insofern ist es sehr bemerkenswert, daß das Metapterygoid, das bei den Teleosteern dem Hyomandibulare vorn meist dicht angelagert ist, bei Amia und Lepidosteus (Fig. 26) ein selbständiges Gelenk am Prooticum besitzt, so daß also auch hier noch ein „amphistyler" Zustand besteht (selbst bei Teleosteern finden sich gelegentliche Anklänge an dieses Verhalten). Wahrscheinlich ist also, daß das Hyomandibulare bei den meisten Haien entweder zugunsten einer diesem Metapterygoidgelenk analogen Verbindung mehr oder minder unterdrückt oder mit den (2) proximalsten Gliedern des Hyoid verschmolzen ist: bei vielen Rochen sind jenes wie diese noch völlig selbständig (Raja), bei Torpedo ist die Doppelnatur des „Hyomandibulare" deutlich erkennbar, ebenso bei manchen Haien, nur bei den Notidaniden scheint diese kaum nachweislich; funktionell ist der Kieferstiel hier jedenfalls durch den Postorbitalfortsatz des Quadratums ersetzt. Wenn also auch Fusionen des Hyomandibulare mit dem Hyoidbogen vorkommen, so ist jenes doch wohl nicht als eine Abgliederung von diesem zu betrachten; in diesem Sinne sprechen auch embryologische Beobachtungen (Dohrn); das Hyomandibulare gehört mit dem Symplecticum, Quadratum und Articulare eng zusammen (mit denen es auch bei den Landwirbeltieren zum Mittelohr, dem Analogon des Spritzlochkanals, die Beziehungen bewahrt). Sicher scheint, daß die Selachier die Tendenz bekunden, das Hyomandibulare als Kieferträger auszuschalten, im Gegensatz zu den Teleostomen, und daß dies neben vielen anderen ein Punkt ist, in dem sie sich mehr als diese den Amphibien annähern.

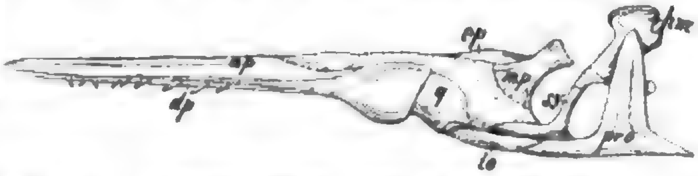


Fig. 26. Gaumenknochen und Kiefersuspensorium von Lepidosteus osseus, von der Außenseite. Nach van Wijhe. ap Auto-, dp Dermopalatinum, q Quadratum, ep Endo-, mp Metapterygoid, hm Hyomandibulare, sy Symplecticum, io Inter-, pro Praeoperculum.

2d) Muskulatur und elektrische Organe. Der umfänglichste und für die Lokomotion wichtigste Muskelkomplex ist der sogenannte Seitenrumpfmuskel, der durch ein im Niveau der Seitenlinie verlaufendes horizontales Septum — (das den Cyclostomen fehlt) — in eine dorsale und eine ventrale Portion geschieden wird; beide zerfallen, der Zahl der Wirbel entsprechend, in Myomere von der Form nach hinten sich zuspitzender ineinandergeschobener Hohlkegel (vgl. Fig. 5): die bindegewebigen Scheidewände (Myocommata) derselben, zwischen denen sich die meist parallel längsverlaufenden Muskelfasern ausspannen, erscheinen nach Entfernung der Haut oberflächlich als winklig geknickte Linien (vgl. Fig. 50). Der Seitenmuskel heftet sich vorn an Knorpel- bezw. Knochenfortsätze des Schädels (Supraoccipitale, Squamosum, Epioticum). Von der Hauptmasse des Seitenmuskels ist bei Haien und Knorpelganoiden durch ein sublaterales Interstitium ein Bauchmuskel gesondert, dessen Fasern seitlich einen schrägen Verlauf (von hinten oben nach vorn unten), ventral einen geraden longitudinalen Verlauf zeigen; er befestigt sich vorn (als gerader Halsmuskel) am Hyoid; in die Schwanzregion ist er nicht weit zu verfolgen. Bei

Digitized by Google

den Teleosteern ist dieser Muskel teilweise von der ventralen Portion des (dorsalen) Seitenmuskels überlagert, deren Fasern ebenfalls schrägen Verlauf (aber von vorn oben nach hinten unten) annehmen; gerade Bauchmuskeln erscheinen als selbständige Stränge; unter der Seitenlinie verläuft hier gewöhnlich nach außen vom Seitenmuskel ein besonderer schmaler Seitenlinienmuskel. Protopterus verhält sich hinsichtlich der Bauchmuskeln wie die Teleosteer (vgl. Knauer, Arb. d. Zool. Inst. Wien Vol. 18, 1910). In den Flossen der Teleosteer treten zu jedem Knochenstrahl gewöhnlich jederseits 2, meist von den Flossenträgern entspringende Muskeln, ein Aufrichter und ein Niederleger, in Beziehung; außerdem oberflächliche Muskeln. Die Muskeln der freien paarigen Flossen entstammen ventralen sogenannten Muskelsprossen der Rumpfmyotome. — Die Muskulatur der Kiefer und Kiemenbögen leitet sich embryogenetisch großenteils von den Seitenplatten her und untersteht, im Gegensatz zur spinalen des Rumpfes, den Nervi Trigeminus, Facialis, Glossopharyngeus und Vagus. Bei den Cyclostomen überlagert die Rumpfmuskulatur die Kiemenregion und erstreckt sich bis nahe ans Vorderende; bei Myxine alternieren die Myomere beider Seiten (wie bei Amphioxus). Ueber die Muskeln der Augen, der Schwimmblase und des Darms siehe bei diesen.

Durch eine kräftige Hautmuskulatur, deren Ausbildung wohl mit der Fähigkeit dieser Tiere, sich durch Luftaufnahme aufzublähen, zusammenhängt, sind die Tetrodonten merkwürdig (Wiedersheim, Festschrift für Kölliker 1887).

Elektrische Organe. Elektrische Organe finden sich bei verschiedenen Fischen als Komplexe von innervierten Kästchen oder Platten mit gallertigem Inhalt; meist sind sie, ihrer Entwickelungsweise nach, mit Sicherheit als modifizierte Partien der Muskulatur zu erkennen (Babuchin). Bei Torpedo (Zitterroche) bilden die Kästchen (zu je etwa 400) vertikale Säulen zwischen dem Kopf und der Brustflosse (jederseits etwa 600), die vom Trigeminus und Vagus innerviert werden. In den die ventrale Seite des Schwanzes (etwa $^4/_5$ der Gesamtlänge) einnehmenden Organen von Gymnotus (Electrophorus, Zitteraal) folgen sich die Platten in der Längsrichtung, die (spinalen) Nerven treten je an die hintere Fläche heran, um hier mit feinen Netzen zu endigen (Ballowitz). Schwach elektrische Organe ähnlicher Art finden sich im Schwanz von Raja clavata (Keulenroche), von Mormyrus und Gymnarchus. Stets wird diejenige Fläche der Kästchen bezw. Säulen, an die der Nerv herantritt, negativ, die entgegengesetzte positiv elektrisch; daher löst gleichzeitige Berührung der Ober- und Unterseite bei Torpedo, des Vorder- und Hinterendes bei Gymnotus, die Entladung aus.

Beim Zitterwels (Malapterurus electricus) umhüllt das Organ, einer Speckschicht gleich dicht unter der Haut liegend, mantelförmig den Körper; es leitet sich hier möglicherweise vom Integument her (nach Fritsch von den Kolbenzellen). Obwohl auch hier die Nerven an der Hinterseite der Platten enden, geht der Schlag von vorn nach hinten: nach Garten (Verh. d. Ges. deutscher Naturforscher u. Aerzte 1911) würde dies der Richtung der in Hautdrüsen auftretenden Sekretionsströme — von der freien Oberfläche gegen die Nervenendigung hin — entsprechen. Der Nerv des ganzen Organs entspringt jederseits von einer einzigen kolossalen Ganglienzelle im Rückenmark. Ein eigenartiges elektrisches Organ liegt bei Astroscopus in der erweiterten Orbita (Dahlgren und Silvester, Anat. Anz. Vol. 29, 1906).

Die elektrischen Schläge von Gymnotus und Malapterurus sind stark genug um kleinere Tiere (Frösche, Fische) zu töten; sie sind auch für größere schmerzhaft; der Nutzen der elektrischen Organe für die damit ausgestatteten Tiere dürfte hauptsächlich in der Abhaltung von Feinden bestehen.

2e) Nervensystem. α) Gehirn. Die Abteilungen des Gehirns sind mehr oder minder horizontal hintereinander geordnet; von ihnen sind das Mittel-, Hinter- und Nachhirn meist relativ bedeutender als das Vorderhirn entfaltet.

Bei den Haien (Fig. 27) erscheinen die Vorderhirnhälften oft fast zu einer unpaaren Masse verbunden; vorn gehen sie in mächtige paarige Riechlappen über. Vom Zwischenhirn geht dorsalwärts eine sehr langgestreckte Epiphysis (Zirbelschlauch) mit in das Schädeldach eingelassenem Endbläschen aus, ventral das Infundibulum mit der Hypophysis und dem Saccus vasculosus (sogenannte „Infundibulardrüse"). Das Mittelhirn wird von dem sehr mächtigen Hinter- oder Kleinhirn zum Teil überdeckt; das Nachhirn (Medulla oblongata) ist meist ansehnlich entfaltet.

Die Teleosteer (Fig. 28) zeichnen sich durch die Reduktion des Vorderhirnmantels (Pallium) zu einer die paarigen Basalganglien (Corpora striata) bedeckenden epithelialen Lamelle aus (Rabl-Rückhard; Studnicka sieht in dieser nur die Dachplatte des primären Vorderhirns, in den Basalganglien die Homologa der Hemisphären; nach F. Fuchs [1908] kommen solche aber den Teleosteern überhaupt nicht zu). Die verhältnismäßig kleinen Riechlappen sitzen dem Vorderhirn unmittelbar oder vermittelst stielartiger Zwischenstücke

Digitized by Google

auf. Außer der Epiphysis ist, dicht vor ihr, ein Parietalorgan, wenngleich in rudimentärem Zustande, erhalten. Bei einigen Tiefseefischen (Argyropelecus, Cyclothone) enden diese Fortsätze mit bläschenförmigen Anschwellungen; eigentliche parie-

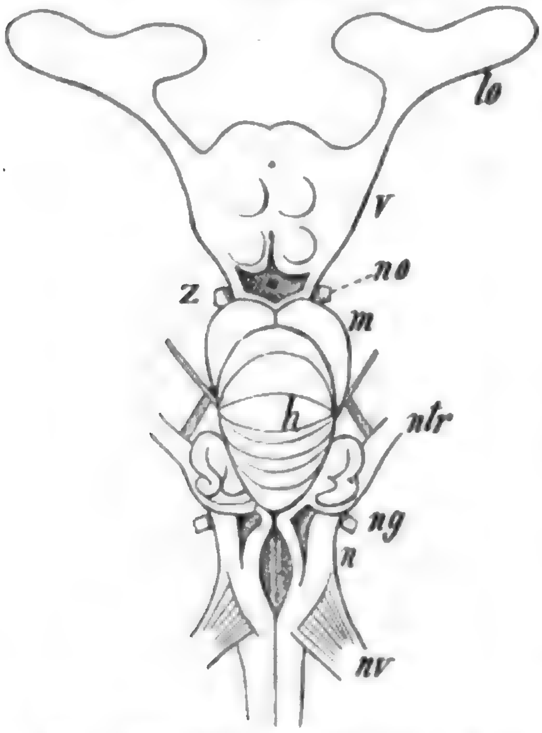


Fig. 27. Gehirn von Galeuscanis. lo Lobus olfactorius, v Vorderhirn, z Zwischen-, m Mittel-, h Hinter-, n Nachhirn; no Nervus opticus, n tr N. trigeminus, ng N. glossopharyngeus, nv N. vagus. Nach Rohon.

tale Sinnesorgane kommen aber nicht vor (vgl. Handrick, Zoologica 13. Bd. 1901, Gierse, Morph. Jahrb. 32. Bd. 1904). Ein Scheitelloch erhält sich bei Callichthys. Der Saccus vasculosus ist bei Meeres-, besonders bei Tiefseefischen und pelagischen Larven (Aallarven u. a.) sehr groß, klein bei Süßwasserfischen; er enthält eigenartige Sinneszellen und wird daher neuerdings als Sinnesorgan (für Tiefenwahrnehmung?) gedeutet (Boeke, Dammermann). Das stets paarige Mittelhirn stellt den ansehnlichsten Hirnteil dar. Das ebenfalls voluminöse Hinter- oder Kleinhirn schiebt sich nach vorn hin in die Höhle des vorigen (als Valvula cerebelli)

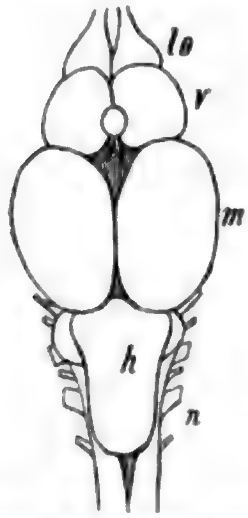


Fig. 28. Gehirn von Salmo fario, Be-Bezeichnungen wie in Fig. 27; median hinter dem Vorderhirn die Epiphysis. Nach Agassiz und Vogt.

ein, hinten überlagert es mehr oder weniger das Nachhirn (Rautengrube). Das Kleinhirn ist im allgemeinen bei beweglichen Formen höher als bei trägen ausgebildet; es scheint Eindrücke aus verschiedenen Sinnesgebieten zu assoziieren und als Regulationszentrum lokomotorischer Innervationen einen ähnlichen physiologischen Rang wie das Großhirn der Landwirbeltiere einzunehmen (Franz); excessive Entfaltung erlangt es bei den Mormyriden.

Das Gehirn der Ganoiden neigt sich in der Reduktion des nervösen Palliums, der Lagerung des Hinterhirns u. a. den Teleosteern zu. In mancher Hinsicht eigenartig verhalten sich die Crossopterygier; so kommuniziert hier noch postembryonal die Hypophysis mit der Mundhöhle; die Infundibulardrüse besteht aus engen Tubuli; die Zirbel stellt einen weiten epithelialen Sack dar; die Bildung des Vorder- und des Hinterhirns (Valvula cerebelli) ist teleosteermäßig. Die Dipnoer (Fig. 29) nehmen im Gehirnbau eine vermittelnde Stellung zwischen Selachiern und Amphibien ein (Burckhardt); die überwiegenden, fast völlig gesonderten Vorderhirnhemisphären haben ein nervöses, nur bei Ceratodus teilweise ependymatöses Pallium; das Mittelhirn ist bei Ceratodus paarig, sonst unpaar; das Kleinhirn unbedeutend; ein Saccus vasculosus scheint zu fehlen (wie bei Urodelen).

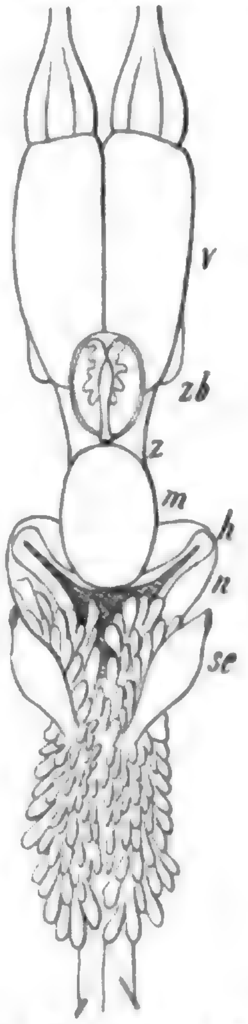


Fig. 29. Gehirn von Protopterus. zb Epiphysis, se Saccus endolymphaticus (sonst gleiche Bezeichnungen wie in Fig. 27). Nach Burckhardt 1892.

Die Cyclostomen weisen auch im Gehirnbau einfache, aber zweifellos zum Teil auf Rückbildung beruhende Verhältnisse auf, die im wesentlichen die bei den Teleosteern bereits bestehende Beschränkung des Vorderhirns auf die zum Riechorgan in Beziehung stehenden Teile, Lobus olfactorius und Corpus striatum, ins Extrem geführt zeigen (Edinger). Nicht nur das Vorderhirndach, sondern auch dasjenige des

Digitized by Google

Mittelhirns verharren auf epithelialem Ausbildungsgrad; auch das Kleinhirn ist sehr reduziert, besonders bei Myxine; bei letzterer sind die Ventrikel äußerst eingeschränkt, die Plexus chorioidei des Hirndaches sehr schwach entwickelt und auch der Saccus vasculosus fehlt.

Besonderes Interesse beansprucht bei Petromyzon das Bestehenbleiben bläschenförmiger, durch besondere Nerven mit dem Zwischenhirn verbundener Reste des Parietalorgans und der Epiphysis, von denen insbesondere letztere hier noch deutliche Zeichen ihrer früheren Bedeutung als Sehorgan (Parietalauge) trägt (Sinneszellen in der pigmentierten inneren, linsenartige Ausbildung der äußeren Wand).

β) Rückenmark. Das Rückenmark erstreckt sich bei den Fischen meist durch die ganze Länge des Rückgratkanals; bisweilen löst es sich indessen nach kurzer Erstreckung in eine Cauda equina auf (Lophius, Plectognathen). Die Anordnung der zelligen und faserigen Substanz ist nicht so allgemein fixiert wie bei den höheren Wirbeltieren.

Gehirn und Rückenmark füllen den Schädelhohlraum bzw. den Rückgratkanal bei weitem nicht aus; sie sind von lockerem, an Lymphräumen und Fett reichem Bindegewebe umschlossen; (die Dura mater des Gehirns ist vom inneren Periost nicht gesondert; das innere lockere Gewebe — Pia mater — bildet stellenweise gefäßreiche, vielgefaltete, z. T. in die Ventrikel eingestülpte Decken, Telae chorioideae). Ueber dem Rückenmark verläuft ein weiter ununterbrochener Lymphkanal.

γ) Gehirnnerven. Die Nervi olfactorii sind in Anbetracht der geringen Entfernung der Riechlappen bzw. Bulbi vom Geruchsorgan meist sehr kurz. Bei vielen Selachiern, bei den Dipnoern und bei Amia tritt jederseits zum Geruchsorgan noch ein Nerv in Beziehung, der median im Septum der Vorderhirnhälften entspringt: Nervus terminalis. Die Optici bilden bei den Ganoiden ein echtes Chiasma, bei Teleosteern meist eine einfache Kreuzung (bei Clupeiden unter Durchbohrung des einen Nerven durch den anderen) stets ohne Faseraustausch; ihre zentrale Endigung finden sie im Dach des Mittelhirns (Lobi optici). Der Oculomotorius, Abducens und wohl auch der Trochlearis entsprechen ventralen (motorischen) Spinalnervenwurzeln. Eine Besonderheit, (welche die Fische nur mit den aquatilen Amphibien teilen), stellen die mächtigen, die Nervenhügel bezw. Seitenorgane (s. u.) versorgenden Aeste dar: die Rami ophthalmicus superficialis, buccalis und mandibularis des Facialis und der gleichfalls diesem (nicht dem Vagus) zuzuordnende Nervus lateralis; alle diese entspringen dem gleichen zentralen Gebiet wie der Acusticus. Auch die die Kiemenmuskulatur versorgenden Vagusäste sind besonders stark ausgebildet. Mit dem verlängerten Mark verbinden sich eine wechselnde Zahl von Spinalnerven, deren vorderster den Hypoglossus repräsentiert.

δ) Spinalnerven. Die Spinalnerven entspringen bei den Teleosteern in jedem Segment mit paarigen oberen und unteren Wurzeln; bei den Elasmobranchiern, Cyclostomen und Dipnoern wechseln das obere und das untere Wurzelpaar in aufeinanderfolgenden Segmenten ab. Bei den Petromyzonten (nicht aber den Myxinoiden), bleiben dorsale und ventrale Wurzeln völlig getrennt (wie bei Amphioxus). — Ein Grenzstrang des Sympathicus ist bei den Teleosteern wohl ausgebildet, bei den Selachiern, mehr noch bei den Cyclostomen, unvollkommen.

2f) Sinnesorgane. *α*) Geruchsorgane. Das Geruchsorgan besteht in der Regel aus wenig tiefen paarigen Gruben, deren Grund mit dem oft reich und in wechselnder Anordnung gefalteten Riechepithel bekleidet ist, — ohne Verbindung mit der Mund- und Rachenhöhle. Bei den Selachiern liegen sie fast stets auf der Unterseite des Rostrums, ihre Oeffnungen werden von Hautlappen derart überdeckt, daß je eine vordere Ein- und eine hintere Ausströmungsöffnung freigelassen werden; von letzterer führt oft eine Furche (Nasolabialrinne) zum Munde. Bei Chimaera umschließt eine gemeinsame Falte den Mund und die Geruchsgrube; bei den Dipnoern liegen beide Nasenöffnungen innerhalb der Mundränder; (embryonal tritt bei ihnen ein dem der Selachier entsprechender Zustand auf).

Bei den Teleosteern und Ganoiden wird die Nasenhöhle nie vom Inspirationsstrom berührt; sie liegt auf der Oberseite der Schnauze und ist fast stets (Ausnahmen: Chromidae, Labridae, Gasterosteus) mit einer vorderen (oft am Ende einer röhrenförmigen Erhebung liegenden) und einer hinteren Oeffnung versehen. Bei Polypterus ist das Riechorgan in 6 radiäre Fächer geteilt, zu denen noch eine Vorhöhle kommt. Auch bei Teleosteern, besonders Acanthopterygiern, stehen mit der Riechgrube oft umfangreiche, meist mit indifferentem Epithel ausgekleidete, bei gewissen Pleuronectiden u. a. aber schleimabsondernde Blindsäcke in Verbindung, die häufig, der Einwirkung benachbarter Skelettstücke unterliegend, wohl den Wasserwechsel im Riechorgan begünstigen; bei den Aalen u. a. erfolgt dieser durch Cilienschlag, bei Cypriniden u. a. durch Ableitung von Wasser in das vorderste Nasenloch durch eine hinter diesem stehende Hautfalte bei der Fortbewegung (Burne, Proc. Zool. Soc. London 1909). Bei den Tetrodonten endet der Riech-

Digitized by Google

nerv bald an einer flachen Hauteinsenkung (Tetrodon papua), bald an einem durchbohrten oder gespaltenen Tentakel. Das Riechepithel tritt hier in knospenförmigen Bezirken auf (Wiedersheim, Festschrift für Kölliker 1887); ähnlich fand es Blaue (Arch. Anat. Physiol. 1884) bei Belone, Trigla, Exocoetus u. a. m.; stets enthalten diese Gebilde aber primäre (direkt in Nervenfasern übergehende) Sinneszellen. Kommunikation der Nasen- mit der Mundhöhle wird in einigen Fällen angegeben, so für Cynoglossus semilaevis (Kyle, Journ. Linn. Soc. London XXVII), Astroscopus guttatus (Dahlgren, Science Vol. 27) und gewisse Muraenoiden (Chilorhinus, Ichthyopus, nach Lütken 1852).

Die Cyclostomen zeichnen sich durch ein Geruchsorgan mit unpaarer dorsaler Oeffnung und distalem Abschnitt (Nasengang) aus, die Riechsäckchen der olfactorischen Region sind indessen symmetrisch zu einem medianen Septum geordnet, wie denn auch Nervi und Lobi olfactorii paarig bleiben; das Riechepithel bildet durch indifferentes Epithel voneinander geschiedene Bezirke (Lubosch). Bei Myxinoiden ist der Nasengang innen nicht blind geschlossen, sondern gewinnt eine Oeffnung in die Mundhöhle. Embryonal entsteht das Geruchsorgan aus der Verschmelzung paariger Anlagen („Plakoden" Kupffers) mit einer unpaaren, die wohl der „Flimmergrube" des Amphioxus entspricht; der von der Nasenhöhle nach hinten bis zur Infundibularregion des Gehirns auswachsende Nasenkanal entspricht der Hypophysis, deren Anlage schon frühzeitig sich mit der des Geruchsorgans vereinigt.

β) Geschmacksorgane. Geschmacksorgane treten in Form knospenförmiger Gruppen von (sekundären) Sinneszellen (Sinnesknospen, becherförmige Organe) auf, insbesondere an den Mundrändern, auf den Bartfäden, wo solche vorhanden, aber auch sonst zerstreut in der äußeren Haut, ferner in der Mund- und Rachenhöhle, selbst im Oesophagus (Störe, Syngnathiden).

Die Scheidung von Geruchs- und Geschmacksreaktionen macht bei Wassertieren begreiflicherweise Schwierigkeiten; es scheinen aber die Geschmacksknospen nur auf mehr oder minder nahe Berührung mit löslichen Stoffen zu reagieren, während die Nase eine Witterung auf weitere Strecken hin erlaubt. So vermögen Fische verborgene Nahrung aufzufinden; nicht mehr indessen, sobald die Funktion der Nasenschleimhaut ausgeschaltet wird (Parker, Copeland).

γ) Sehorgane. Der Augenbulbus hat oft eine abgeflachte Vorderwand, doch nicht immer eine flache Cornea. Die Linse ist kugelig, periskopisch, nicht formveränderlich, von hohem Brechungsindex (1,65). Die Pupille ist meist sehr weit, der Irisausschnitt läßt sowohl die Randstrahlen der Linse, als auch meist völlig ungebrochenes Licht eintreten. Helligkeitsadaptation wird (bei Teleosteern) vornehmlich durch Wanderung des Retinapigments bewirkt. Die Sklera ist meist knorpelig, bei Teleosteern oft teilweis verknöchert, bei den Selachiern durch eine knorpelige „Bulbusstütze" mit dem Cranium gelenkig verbunden. Einwärts von ihr ist der Bulbus der Teleosteer von einer (durch Einlagerung von Guaninkristallen) silberglänzenden Haut, Argentea, umgeben. Bei vielen Teleosteern und bei Amia tritt zwischen der Sklera und der pigmentierten Chorioidea eine sogenannte Chorioidealdrüse auf, ein Wundernetz, das Blut aus der Arteria ophthalmica magna empfängt und in die Chorioidea abgibt, von wo die Venen wieder in die „Drüse" zurückkehren. Ihr Auftreten scheint daher bis zu einem gewissen Grade vom Vorhandensein einer Pseudobranchie (s. u.) abhängig, und umgekehrt (Joh. Müller); doch gilt diese Beziehung nicht ausnahmslos; möglicherweise stellt das Gefäßnetz der Chorioidealdrüse den Ueberrest einer (vor der Spritzlochkieme gelegenen) Kieme dar. — In der Retina überwiegen die Stäbchen, Zapfen fehlen in vielen Fällen, durchweg bei Selachiern und Cyclostomen; eine Fovea centralis ist bisweilen ausgeprägt (sehr gut bei Lophobranchiern, wo sie, nach Carrière, nur sehr lange Zapfen enthält).

Bei den Teleosteern springt eine bindegewebige, pigmentierte, Gefäße und Nerven führende Falte (Processus falciformis) der Augenspalte entlang ins Augeninnere vor; sie setzt sich in einen glatte Muskelfasern enthaltenden Strang fort (Campanula Halleri, Musculus retractor lentis), der sich an den unteren Rand der oben durch das Ligamentum suspensorium gehaltenen Linse heftet. Das ruhende Auge ist für das Sehen in der Nähe eingestellt, es accommodiert für die Ferne, indem durch Kontraktion des Linsenmuskels die Linse nach innen und hinten gezogen, also der Retina genähert wird (Th. Beer). Bei den Selachiern ist der Linsenmuskel rudimentär, Accommodation nicht nachweisbar. Bisweilen tritt hier eine lichtreflektierende Schicht hinter der Retina, ein Tapetum lucidum, auf (übrigens auch bei gewissen Teleosteern, z. B. Abramis u. a., besonders bei den Tiefseeformen).

Bei Protopterus fehlen der Linsenmuskel, die Chorioidea und die Argentea; über Accommodation ist nichts bekannt; auch beim Stör scheint sie zu mangeln. — Die Augen der Cyclostomen sind in der Regel klein, bei den parasitischen Myxinoiden unter der Haut verborgen und im Bau auf

Digitized by Google

niederer Stufe verharrend (vgl. S. 1092); ihre Nerven und Muskeln degenerieren.

Augendrüsen fehlen stets; der Bewegung des Bulbus dienen, wie gewöhnlich, 4 gerade und 2 schiefe Muskeln, von denen jene oft in einem besonderen Knochenkanal (Myodom) eingeschlossen; stets scheinen beide Augen unabhängig voneinander beweglich. Augenlider fehlen im allgemeinen; bei einigen Teleosteern jedoch (Salmoniden, Clupeiden, Caranx, vgl. Fig. 31) legen sich unbewegliche Hautfalten von vorn oder hinten her über die corneale Fläche des Bulbus hinweg. Ein Teil der Selachier besitzt eine durch Muskeln bewegliche Nickhaut (Carcharias, Galeus, Zygaena, Mustelus, Scyllium); die Homologie derselben mit der Nickhaut der tetrapoden Wirbeltiere ist noch zweifelhaft; beachtenswert ist, daß bei den genannten Haien das Spritzloch klein ist oder fehlt und seine Muskulatur verkümmert ist; es scheint also zwischen der Ausbildung dieser und der der Nickhaut ein reziprokes Verhältnis zu bestehen; die Nickhautmuskeln sollen sich von denen des Spritzloches herleiten (Harman, Journ. Anat. Physiol. Vol. 34, 1900).

Bei Periophthalmus, der auf dem Lande Insekten jagt, also wohl in der Luft scharf sieht, sind die kugelig vortretenden Augen mit unteren Augenlidern versehen; die Augen sind emmetropisch und accommodieren für die Nähe (Heß, Vergleichende Physiologie des Gesichtssinnes 1912). Das Auge von Anableps tetrophthalmus ragt beim Schwimmen zur Hälfte aus dem Wasser und ist demgemäß in eine zum Sehen im Wasser und eine zum Sehen in Luft geeignete, durch Cornea- und Linsenkrümmung von jener verschiedene Abteilung zerlegt (Schneider-v. Orelli 1907).

Verkümmerung der Augen findet sich durchweg bei Höhlenfischen (Amblyopsis, Thyphlichthys, Troglichthys, Lucifuga, Stygicola), obwohl ihre Wohnorte nicht völlig lichtlos sind (cf. Eigenmann, Publ. Carnegie Inst. 1909); selten bei Tiefseefischen (Barathronus). Die Augen der letzteren sind oft teleskopartig verlängert, die Sehachsen parallel nach vorn oder oben gerichtet; ihre Linse ist sehr groß, die Iris rudimentär, die Cornea hoch gewölbt; nur am Augengrunde ist die Retina wohl ausgebildet (Hauptretina) und enthält hier sehr zahlreiche sehr lange Stäbchen (meist keine Zapfen); oft sind Nebenretinae vorhanden; das Ganze stellt eine Anpassung an das Sehen bei geringsten Lichtintensitäten dar (cf. Brauer, l. c.).

Die Frage nach dem Farbenunterscheidungsvermögen scheint noch offen; nach Heß (l. c.) verhalten sich die Fische wie ein total Farbenblinder, nach V. Bauer (Pflügers Archiv, Vol. 133) haben die Farben außer den Helligkeitswerten spezifische Reizwirkungen („Rotscheu" bei Atherina, „Vorliebe für Blau" bei Box). Aus dem Verhalten der Chromatophoren bei Phoxinus schließt v. Frisch (Zool. Jahrb., Abt. f. Physiol. Vol. 32, 1912), daß Rot und Gelb in besonderer Weise, nicht nur ihrem Helligkeitswert nach, empfunden werden: nur über rotem oder gelbem Grunde erfolgt die Expansion der roten Chromatophoren und damit das Auftreten blutroter Flecke, niemals aber über grauem Grunde von gleichviel welcher Helligkeit.

δ) Ohrlabyrinth und Nervenhügel. Das Labyrinth besteht aus dem Sacculus und dem Utriculus mit den 3 Bogengängen; der Ductus endolymphaticus, bei den Teleosteern verkümmert, mündet bei den Selachiern frei nach außen; bei Ceratodus erhält er sich embryonal längere Zeit, bei Protopterus legt sich sein in viele Divertikel zerteiltes Ende über die Rautengrube (Fig. 29). Endorgane des Nervus acusticus (VIII) finden sich in den Ampullen der Bogengänge (Cristae acusticae), im Utriculus (Macula acustica recessus utriculi, M. neglecta) und im Sacculus (Mac. ac. sacculi; oft, besonders bei allen Teleosteern, eine Papilla lagenae in besonderer Ausbuchtung als letzter Rest der Gehörschnecke). Die spezifischen (sekundären) Sinneszellen der Maculae acusticae sind von plumper Gestalt, nur etwa die halbe Länge der zwischen ihnen befindlichen indifferenten Stützzellen erreichend, am freien Ende mit starren Haaren (bezw. Haarbüscheln) versehen. Ueber den M. sacculi und utriculi liegen gallertige cuticulare Abscheidungen, die bei den Selachiern kleine Kalkkörperchen enthalten, bei den Teleosteern zu großen harten Körpern, Otolithen, werden. Schallübertragende Einrichtungen, die denen der höheren Wirbeltiere entsprächen, fehlen; (über die Verbindung des Labyrinths mit der Schwimmblase s. u. bei dieser). — Von den Cyclostomen hat Petromyzon nur 2 Bogengänge, die bei Myxine sich zu einem verbinden.

Das Labyrinth der Fische gilt hauptsächlich als Organ der reflektorischen Gleichgewichtserhaltung und übt zudem einen beständigen Einfluß auf den Tonus der Rumpfmuskulatur aus (Ewald); Parker (1903) beobachtete bei Fundulus als Reaktion auf ins Wasser übertragene Schallschwingungen bestimmte Flossenbewegungen, die nach Durchschneidung der Nervi acustici unterblieben; im allgemeinen wird das Hörvermögen der Fische bezweifelt.

Das System der vornehmlich in der Seitenlinie lokalisierten Sinnesorgane weist manche Aehnlichkeiten mit dem Ohrlabyrinth auf; die Endorgane bilden den Maculae acusticae vergleichbare Sinnesepithelplatten oder knospenartige Komplexe („Endhügel") von Sinneszellen; letztere gleichen in Form, Lage, Haarbesatz, durchaus denen im Labyrinth; cuticulare (aber nicht verkalkte) „Cupulae terminales" ent-

Digitized by Google

sprechen den Otolithen. Die Endorgane, meist segmental geordnet, sind entweder in besondere, ins Corium eingebettete Hautkanäle („Schleimkanäle") eingeschlossen, oder sie stehen frei im Niveau der Epidermis; häufig liegen ein Teil in Kanälen, die übrigen frei. Die Organreihen, bezw. die sie beherbergenden Kanäle folgen bestimmten Zügen, deren wichtigste am Rumpf jederseits eine Längs-, die sogenannte „Seitenlinie" (oder deren mehrere), am Kopf ein Supraorbital-. Infraorbital- und ein Mandibular- sowie ein transversaler Occipitalast sind. Die Kopfkanäle sind häufig von Deckknochen des Schädels, die Rumpfkanäle von Schuppen (bei **Chimaera** von Knorpelringen), umschlossen; sie öffnen sich mit kurzen Seitenkanälchen nach außen. Die Innervation der Endorgane erfolgt teils (in den Kopfkanälen) durch den Facialis, teils durch den zur gleichen Gruppe zu rechnenden Nervus lateralis.

Modifizierte Bestandteile des Seitenkanalsystems werden bei den Rochen als **Savische Bläschen**, bei den Haien als **Lorenzinische Ampullen**, bei den Ganoiden als **Nervensäckchen** bezeichnet; sie sind auf die Kopfregion beschränkt. Bei den Rochen erlangt das Schleimkanalsystem, über die Brustflossen sich ausbreitend, oft eine sehr komplizierte Ausbildung.

Besonderer Reichtum an Endorganen dieses Systems geht nicht notwendig mit reicher Entfaltung der Schleimkanäle Hand in Hand und umgekehrt. So finden sich häufig bei rudimentärem Kanalsystem mehrere Längs- und zahlreiche Querreihen freier Seitenorgane (z. B. bei Gobiiden, vgl. **Porichthys**, Figur 30); das Kanalsystem seinerseits erlangt unter Teleosteern z. B. bei **Trachurus** (**Caranx**) reichste Entfaltung: Bildung verzweigter Seitenäste, Hinzutreten ungewöhnlicher Hauptstämme dorsomedian auf dem Kopfe und jederseits längs der Rückenflosse (Fig. 31). — Häufig erhalten sich, als Rudimente der embryonalen Epithelleiste, in der sich die Endorgane differenzieren, diese verbindende Zellstränge; bisweilen (**Fierasfer**, **Echeneis**, **Julis**) erscheinen dieselben kanalartig; mit den Schleimkanälen haben sie aber nichts zu tun.

Man hält die Seitenorgane gegenwärtig für Rezeptoren strömender Wasserbewegung (**Hofer**, nach Befunden am Hecht); indessen fand **Parker** (Bull. Bur. Fish. Washington 1905), daß sie auf Vibrationen von geringer Frequenz, nicht aber auf Druck oder Strömungen reagieren; beachtenswert ist ferner, daß Fische nach Verlust des Labyrinths auf starke Schallwirkungen reagieren (**Kreidl**) und daß auch geblendete Fische festen Körpern sicher ausweichen, also über eine Art von „Tasten in die Ferne" verfügen. Besondere Endapparate, die auf grobe Berührungen von seiten fester Körper reagieren, kommen bei Fischen wohl kaum vor; die Bartfäden, Tentakel usw. verdanken ihre Empfindlichkeit hauptsächlich dem Reichtum an Sinnesknospen, dienen also mehr einem „Abschmecken" der Umgebung. Die tasterartigen isolierten Flossenstrahlen von **Trigla** und **Peristhetion** sind sehr reich an Nerven, doch enden diese wohl frei, ohne spezifische Endorgane (nach **Jourdan** bei Peristhetion, nach **Zincone** bei Trigla dagegen mit spindelförmigen intraepithelialen Zellen). Beachtenswert ist, daß bei Amphibien mit dem Uebergang zum Landleben „Tastflecken" (mit im Corium liegendem nervösem Endapparat) sich an die Stelle der degenerierenden Endhügel setzen (**Maurer**).

2g) **Verdauungs- und Respirationstractus.** Der Verdauungs- und Respirationstractus gliedert sich in Mund- und Rachenhöhle, Schlund, Magen — diese können als Vorderdarm zusammengefaßt werden —

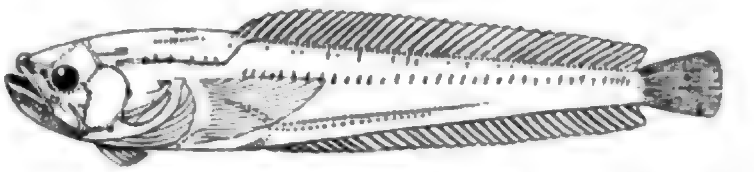


Fig. 30. **Porichthys notatus** Girard. Kopfkanäle punktiert, freie Endhügel schwarz, Kreischen Leuchtorgane (letztere nur zum Teil erkennbar). Nach **Greene** 1900.

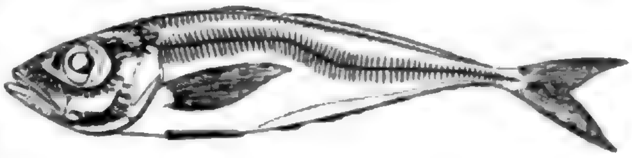


Fig. 31. **Trachurus** (**Caranx**) **trachurus**. Kopf- und Seitenkanäle.

Mitteldarm und Enddarm. Zum Vorderdarm treten Kiemen, Lungen oder Schwimmblasen, zum Mitteldarm Appendices, Leber und Pancreas, zum Enddarm bei einigen die Harn- und Geschlechtsorgane in Beziehung.

α) **Bezahnung.** Die Bezahnung beschränkt sich sehr oft nicht auf die Mundränder bezw. die Kiefer. Die Zähne an dem meist querschlitzförmigen Maul der Haie (vgl. Fig. 6) gleichen oft den Hautzähnen (s. o.), sind indessen meist größer; in gewissen Fällen (**Cestracion** u. a.) sind sie nicht spitz, sondern nehmen die Beschaffenheit flacher Pflasterzähne an. Beständiger Ersatz findet von einer an den Kieferrändern einwuchernden Epithelplatte, „Zahnleiste", aus statt. Die Zähne stehen meist in mehreren gleichzeitig tätigen transversalen Reihen, dehnen sich übrigens nach hinten oft auf den Rachen bis zum Schlundbeginn aus.

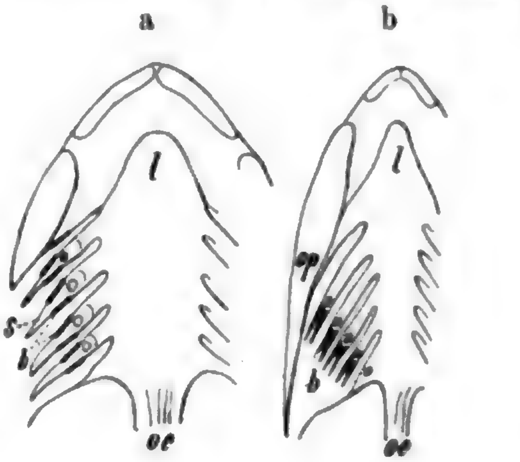
Die Teleosteer können Zähne nicht nur auf den Kieferknochen (Intermaxillare, Maxillare, Dentale, Spleniale), sondern so ziemlich auf allen an der Begrenzung der Mund- und Rachenhöhle teilnehmenden

Digitized by Google

Knochen tragen (Vomer, Palatinum, Pterygoid, Parasphenoid, Entoglossum, Kiemenbögen, besonders auf den oberen und unteren Schlundknochen). Die Beziehungen der harten Papillen am Eingang in den Oesophagus bei Stromateus u. a. zu wahren Zähnen sind unklar. Die Teleosteerzähne haben meist die Form nach hinten gekrümmter (bisweilen — Lophius — umlegbarer) spitzer Haken, dienen also weniger zum Zerkleinern als zum Erfassen der Beute. Die Zähne auf den Schlundknochen sind indessen oft mahlzahnartig (Cypriniden, Scariden), die Kieferzähne gelegentlich meißelförmig (Balistes Fig. 56, Spariden); bei den Scariden und den gymnodonten Plectognathen verschmelzen mehrere aufeinanderfolgende Generationen von Zähnen mehr oder minder vollständig zu scharfkantigen schnabelähnlichen Kauwerkzeugen, mit denen diese Fische hartschalige Nahrungstiere zerbeißen. Andererseits finden sich Fische mit borstenartig feinen, biegsamen Zähnen (Chaetodonten, Loricariiden). Gänzlich zahnlos sind die Syngnathiden und Coregonus. Die Zähne der Teleosteer entstehen meist in senkrecht zur Oberfläche gestellten Epidermislamellen; bisweilen (Balistes) tritt indessen eine Zahnleiste auf (Ghigi, Arch. zool. Vol. 2). Die Bezahnung bei Crossopterygiern und Holosteern gleicht der bei Teleosteern. Den erwachsenen Stören fehlen Zähne, Scaphirhynchus und Polyodon kommen sie zu. Die Dipnoer tragen auf dem Vomer, dem Pterygopalatinum und dem Spleniale je eine scharfkantige mehrhöckerige, durch Concrescenz zahlreicher röhrenförmiger Einzelzähne entstandene Zahnplatte; topographisch entsprechen diese den zahntragenden Bezirken der Selachier. Ganz ähnlich verhalten sich die Holocephalen; doch ist Concrescenz von Einzelzähnen hier embryologisch nicht nachweisbar; die Platten bestehen aus spongiöser osteoider Substanz, sind schmelzlos, schließen aber weiche Dentinmassen ein (Schauinsland 1903).

Die Zunge der Fische ist nie muskulös; sie stellt einen vom Glossohyale gestützten, bisweilen zahntragenden Wulst am Mundhöhlenboden dar (Fig. 12 u. 14, gh). Zusammengesetzte Mundhöhlendrüsen fehlen durchweg, außer bei Petromyzon; dagegen sind einzellige acidophile und Becherzellen nicht ungewöhnlich. Die Vorverdauung der Nahrung durch Kauen und Speichelwirkung muß also bei den Fischen durchschnittlich unbedeutend sein. — Hautsäume um die Kieferränder zeichnen die „Lippfische" (Labridae) aus; flache eigentliche Lippen, denen der Froschlarven gleichend, finden sich bei Loricariiden und gewissen Cypriniden. Bei den Petromyzonten umschließen am Rande gefranste Lippen eine trichterförmige Mundbucht (Vestibulum), welche als Saugscheibe dient und wie die raspelartige Zunge konische Hornzähne trägt (s. oben S. 1058).

β) Kiemensystem. Die seitlich von den Kiemenspalten durchbrochene Vorderdarmregion läßt sich als Rachen abgrenzen. Die inneren Kiemenspalten führen bei den Selachiern in Taschen, die durch Septen (Fig. 32a, s) voneinander getrennt sind und durch äußere Kiemenschlitze ins Freie münden; bei den Teleosteern in eine geräumige, außen vom Kiemendeckel (Fig. 32b, op) und der Kiemenmembran (Membrana branchiostega) umschlossene Kiemenhöhle, welch letztere jederseits eine mehr oder minder weite äußere Kiemenöffnung hat. Im ersteren Falle sind die eigentlich respiratorischen Bezirke, die Kiemenblättchen (Fig. 32, b), entlang



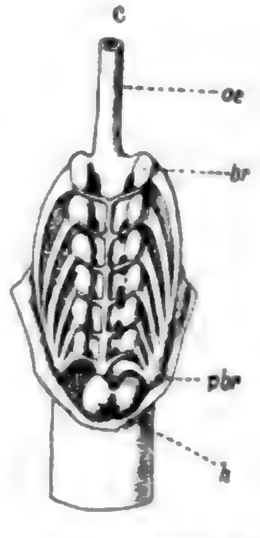


Fig. 32. a) Horizontalschnitt durch den Pharynx eines Haifisches, b) eines Teleosteers. Nach Gegenbaur. c) Kiemenapparat von Myxine. Nach J. Müller. l Zunge, b Kiemenblättchen, br Kiemensack, p br Porus branchialis, s Kiemenseptum, oe Oesophagus, h Herz (von dem die ventrale Aorta mit den zuführenden Kiemengefäßen ausgeht).

ihrem dem zuführenden Gefäß entsprechenden Rande mit den Septen verwachsen; den letzteren dienen die schon oben erwähnten, mehr oder minder zahlreichen knorpeligen „Kiemenstrahlen" zur Stütze. Bei den Teleosteern sind die Kiemenblättchen nur an der Basis angeheftet, sie sitzen dem Bogenrand 2-zeilig (alternierend) auf. Zwischen beiden Befunden vermitteln die Chimaeren und Dipnoer, bei denen die Septen halb zurückgebildet, die Blättchen also nur teilweise angewachsen sind; zugleich legt sich hier ein dem Hyoid angeschlossener Kiemendeckel über sie hinweg. Auch bei Chlamydo-

Digitized by Google

selachus findet sich in der teilweisen Ueberdeckung der hinteren Kiemensepten durch die vorderen, besonders die der Hyoide, eine Hinneigung zu diesem Zustand. Die Chondrosteer und Knochenganoiden verhalten sich in der Hauptsache wie die Teleosteer; mit den Septen schwinden die den Selachiern eigentümlichen Radien; statt ihrer finden sich wie bei den Teleosteern knorpelige bezw. verknöcherte Kiemengräten (s. o. S. 1066), die in die Blättchen selbst eindringen und die durch besondere Muskelchen gegen die Kiemenbögen beweglich sind. Jedes Kiemenblättchen ist auf den Seiten, die es seinen Nachbarn in der Reihe zukehrt, mit zarten Querlamellen besetzt; in diesen löst sich das zuführende Gefäß auf in ein von charakteristischen, senkrecht zur Oberfläche gestellten Pfeilerzellen durchsetztes Lacunennetz, aus dem ein abführendes Gefäß hervorgeht. Die Blättchen sind arm an Bindegewebe, von meist sehr niedrigem Epithel bekleidet. Die „büschelförmigen" Kiemen der Syngnathiden unterscheiden sich von den gewöhnlichen nur durch die geringe Zahl der breiten, mit schmalerem Stiel festsitzenden Blättchen.

In der Regel finden sich 5 Kiemenspalten (6 bei Hexanchus, Chlamydoselachus und Pliotrema, 7 bei Heptanchus; mehr bei Cyclostomen, s. u.). Rückbildungen sind bei Teleosteern nicht selten, so kommen den Pediculaten nur 2, 2½ oder 3 Kiemen zu, fast gänzlicher Schwund der Blättchen liegt bei Amphipnous vor; bei den Scariden führt die Spalte zwischen dem IV. und V. Bogen in einen geschlossenen Blindsack, gewissermaßen eine Backentasche, welche die einer Art Wiederkäuung durch die Schlundzähne unterliegende Nahrung aufnimmt. Bei Protopterus sind die Blättchen am I. und II. Bogen reduziert, doch ziehen sich hier die Blättchen der hinteren Reihe am IV. Bogen auf die Hinterwand der letzten (5.) Kiemenspalte hinüber. — Bei Elasmobranchiern trägt die Vorderwand der 1. Tasche, deren vordere Begrenzung der Hyoidbogen bildet, eine Blättchenreihe; die entsprechende Halbkieme findet sich auch bei den Acipenseriden und bei Lepidosteus, hier nach ihrer Lage Opercularkieme genannt, und bei den Dipnoern; bei Lepidosteus und Protopterus empfängt sie venöses Blut aus dem Truncus arteriosus, bei Ceratodus dagegen arterielles aus einer ventralen Fortsetzung der abführenden Arterie des I. Kiemenbogens; ähnlich verhält sie sich (nach H. Virchow, entgegen älteren Angaben Joh. Müllers) bei Acipenser; in beiden Fällen büßt sie also ihre Bedeutung für die Atmung ein. Bei Amia und den Teleosteern fehlt die Opercularkieme ganz, was wohl damit zusammenhängt, daß der Hyoidbogen hier aus der Reihe der Kiemenbögen herausgerückt und mit seinen Anhängen ganz zu einem Schutz- und mechanischen Hilfsorgan der eigentlichen Atmungswerkzeuge geworden ist.

Bei den Plagiostomen führt, meist nahe hinter dem Auge mündend, als sogenanntes Spritzloch (Spiraculum), ein enger Kanal vom Rachen nach außen, der als Rest einer Kiemenspalte zwischen Mandibular- und Hyoidbogen aufgefaßt wird und der auch in der Regel an seiner Vorderwand eine rudimentäre Kieme enthält. Von dieser Spritzlochkieme kann sich ein Rudiment auch bei fehlendem Spritzloch erhalten (Carcharias), umgekehrt kann auch ein Spritzloch ohne Kieme bestehen (Scymnus, Lamna, Myliobatis, Trygon). Das Spritzloch fehlt allen Holocephalen und Dipnoern, erhält sich aber bei den Chondrostiern (außer Scaphirhynchus) und den Crossopterygiern (hier ohne Kieme). Bei den Teleosteern und Holosteern tritt ein Spritzlochgang nur embryonal auf, schwindet aber frühzeitig, an der Stelle der inneren Mündung gelegentlich Blindsackbildungen zurücklassend; die Spritzlochkieme erhält sich indessen meist als ansehnliches Gebilde, als sogenannte Pseudobranchie, die auch hier vor der Spritzlochanlage entsteht (Dohrn), später aber über die mediale Fläche des Hyomandibulare nach hinten rückt und dann oft dorsal der opercularen (Hyoid-)Wand der 1. Kiemenspalte angelagert erscheint. Die Pseudobranchie empfängt arterielles Blut, meist aus der Arteria hyomandibularis, ist also niemals respiratorisch tätig. Sie besteht entweder aus einer größeren Zahl freier Blättchen, deren Struktur von derjenigen der respirierenden Kiemen nur in untergeordneten Punkten (Vereinfachung des Lacunennetzes, bedeutendere Höhe des Epithels) abweicht, oder dieselben sind unter das Rachenepithel versenkt und miteinander verwachsen (bedeckte oder „drüsige" Pseudobranchie). Die Pseudobranchie fehlt den Siluriden, Mormyriden, Muraeniden, Symbranchiden, sehr selten bei Acanthopterygiern; Lepidosteus hat die Pseudobranchie zusammen mit der Opercularkieme. — Näheres über die Blutversorgung der Kiemen siehe unter „Kreislauforgane" (S. 1084).

Die Inspiration erfolgt bei den genannten (gnathostomen) Gruppen durch Erweiterung der Mundhöhle, bei den Fischen mit einem Kiemendeckel auch der Kiemenhöhle, unter Abhebung des Deckels; die äußeren Kiemenöffnungen bleiben hierbei, sei es durch die Ränder der Kiemensepten, sei es durch die Branchiostegalmembran, verschlossen (nur bei den Rochen dienen die sehr weiten Spritzlöcher zum Eintritt des Atemwassers). Bei der Exspiration verengert sich die

Digitized by Google

Mundhöhle; das Wasser wird, da der Austritt durch den Mund durch besondere, vom Dach und Boden der Mundhöhle vorspringende Atemklappen automatisch verhindert wird, durch die Kiemenspalten in die Kiemenhöhle getrieben und strömt durch die äußeren Kiemenöffnungen ab (einzelnes s. bei Baglioni, Zeitschr. allg. Phys., Vol. 7).

Bei den Cyclostomen liegen die (angewachsenen) Kiemenblättchen in beutelartigen Räumen (7 bei Petromyzon, bei Myxinoiden — Bdellostoma polytrema — bis zu 14), die durch enge Oeffnungen einerseits nach außen (und zwar bei Myxine vermittels längerer, in einen Porus branchialis zusammenlaufender Kanäle, vgl. Fig. 32c), andererseits in den Darm (Myxinoiden) bezw. in einen besonderen, aber vorn mit diesem sich verbindenden Längskanal, den „Wassergang", münden (Petromyzon). Die Anlagen der Spritzlochgänge brechen nie nach außen durch; von ihnen aus entwickelt sich die circorale Wimperrinne („Pseudobranchialrinne") der Ammocoeten (Dohrn), die wiederum bei Amphioxus und den Tunicaten ihr Analogon hat. — Im Zusammenhang mit der Verwendung des Mundes als Haftorgan erfolgt auch die Inspiration bei den Petromyzonten durch die äußeren Kiemenlöcher, bei Myxine durch den Nasengang. Die physiologische Bedeutung eines Kanals, der bei den Myxinoiden links hinter den Kiemensäcken vom Oesophagus direkt nach außen oder zum Porus branchialis führt („Ductus oesophageo-cutaneus"), ist unbekannt.

Daß die (inneren) Kiemen bei allen Fischen (und den Amphibien) homologe Bildungen sind, kann nach dem anatomischen Befund kaum ernsthaft bezweifelt werden. Die Bildung der Kiemen beginnt embryonal mit der Sonderung von 6 Paaren seitlicher Divertikel des Vorderdarms (deren erstes zu den Spritzlochgängen wird); ihnen kommen entsprechende Einsenkungen von außen her entgegen, und durch die Vereinigung beider entstehen die offenen Kiemenspalten. Nach Goette (1901) sind nun nur die beutelartigen Kiemenräume der Cyclostomen und die Spritzlochgänge entodermalen Darmtaschen zugehörig, nicht aber die Interseptalräume der Plagiostomen; es seien daher auch nur die Cyclostomenkiemen und die Pseudobranchien echte „Darmkiemen" alle übrigen an ihre Stelle getretene „Hautkiemen". Hinsichtlich der „ectodermalen" oder „entodermalen" Natur der Plagiostomen- und Teleosteerkiemen verhalten sich neuere Autoren teils unentschieden (Marcus 1908), teils bestehen zwischen ihren Angaben diametrale Widersprüche (Moroff, Greil).

Gewöhnlich erstrecken sich die Kiemenblättchen über den die Kiemenspalte, durch die das Atemwasser streicht, begleitenden Teil des Kiemenbogens (Cerato- und Epibranchiale); bisweilen aber erhalten sich mehr dorsale selbständige Komplexe von Blättchen, sei es als Luftatmungsorgane (s. u.), sei es als äußere Kiemen, die außerhalb des Kiemendeckels frei flottieren. Letztere finden sich fast nur als larvale Atmungsorgane, und zwar in 4 Paaren bei den Larven der dipneumonen Dipnoer (Fig. 49), von denen 3 (zum II., III. und IV. Aortenbogen gehörig) sich beim erwachsenen Protopterus erhalten (Fig. 24). Die Polypterus-Larven (Fig. 48), auch die erwachsenen P. lapradei, besitzen eine große kammförmige Außenkieme. die wohl dem Hyoidbogen angehört. — Die frei aus den Kiemenspalten herausragenden Kiemenfäden der Selachier- und einiger Teleosteerembryonen (Gymnarchus, Heterotis, Cobitis) sind nicht mit ihnen zu identifizieren, sondern sind verlängerte Blättchen der inneren Kiemen und dienen wahrscheinlich nicht sowohl zur Atmung, als zur Resorption perivitelliner bezw. intrauteriner Ernährungsflüssigkeiten (Fig. 44).

Als (branchioide) Luftatmungsorgane. teils eine mehr oder minder geräumige Atemhöhle auskleidend, teils baumförmige oder aus gekräuselten Lamellen bestehende, oberhalb der Kiemenbögen angebrachte Skelettstücke überziehend, finden sich Komplexe flächenhaft miteinander verwachsener Kiemenblättchen bei Siluriden (Saccobranchus, Clarias), den Osphromeniden (sogenannte Labyrinthfische) und Anabas (Fig. 51). Bei Saccobranchus, wo sie sich, in den Seitenrumpfmuskel oberflächlich eingebettet, bis zum Beginn der Schwanzregion erstrecken, gehören sie dem IV. Aortenbogen zu und sind ganz analog den gewöhnlichen Kiemen in den Kreislauf eingeschaltet (Rauther, Ergebn. u. Fortschr. d. Zool. Vol. 2, 1910); bei den Labyrinthfischen empfangen sie Blut aus den abführenden Kiemengefäßen des I. und II. Bogens und geben es an die Jugularvenen ab (Henninger).

Der vikariierenden Luftatmung dienen bei Fischen, die zum Aufenthalt in verdorbenem Wasser oder auf dem Lande befähigt sind, außer den genannten Organen und unten noch zu erwähnenden, gewisse reich vascularisierte Bezirke der Mundschleimhaut (Ophiocephalus) oder neben dieser eben solche der Kiemenhöhle und der äußeren Haut (Periophthalmus). Welcher Kategorie die Atemsäcke von Amphipnous, die Kiemenanhänge von Heterotis, Lutodeira und Citharinus zuzuweisen sind, ist bislang nicht ganz sicher zu entscheiden; die bei vielen herbivoren Characiniden sich findenden hornförmigen Kiemenanhänge sind wahrscheinlich wie die Blindtaschen von

Digitized by Google

Scarus sekundär in den Dienst der Nahrungsverarbeitung getreten. — Zur Physiologie der Atmung vgl. „Kreislauforgane" S. 1086.

Die Schilddrüse (Glandula thyreoidea) besteht meist aus einer Anhäufung geschlossener epithelialer Follikel um die Aorta ascendens oder vor dem Abgang der ersten Kiemenarterien von dieser; bei den Neunaugenlarven (Ammocoetes) erscheint sie als eine mit dem Pharynx in offener Verbindung stehende ventrale Einsenkung, deren gefaltete Wand 4 Reihen von Schleimdrüsen enthält.

Die Thymus findet sich bei den Teleosteern als Verdickung der hinteren medialen Wand der Kiemenhöhle oberhalb der Kiemenbögen, bei den Selachiern jederseits oberhalb der Kiemenbögen; sie entsteht aus epithelialen Wucherungen am dorsalen Rand der Kiementaschen; eigentliche Lymphzellen scheint sie nicht zu erzeugen.

γ) Lungen und Schwimmblase. Mit dem Kiemensystem stehen die pneumatischen Anhänge des Darms, Schwimmblase und Lungen, in gewisser morphologischer Beziehung; auf embryologischen Beobachtungen fußend hat man dieselben als eigenartig fortgebildete Kiementaschen gedeutet (Goette, Spengel). Die Schwimmblase liegt stets über dem Darm und mündet, wofern ein offener Luftgang vorhanden, fast ausnahmslos (vgl. unten) an der oberen Schlundwand; die Lungen münden stets mit kurzem oder längerem Gange an der unteren Schlundwand; ihre Anlage und ihr ursprünglicher Platz ist ventral, doch werden sie gelegentlich aus statischen Gründen dorsalwärts verlagert (Dipnoer). Der Eingang beider Organe kann (bei Ganoiden) muskulös und mit eine Art Kehlkopf bildenden fibrösen Teilen versehen sein und Spuren dieser können gleichzeitig dorsal und ventral vorhanden sein (bei Lepidosiren, s. Wiedersheim, Zool. Jahrb. Suppl. Bd. VII, 1904). Es sind demnach wohl Lungen und Schwimmblase für zweierlei (nicht-homologe) Morphen zu halten, wenn sie auch in gestaltlicher wie funktioneller Hinsicht in sehr nahen Beziehungen zueinander stehen (in analoger Weise wie etwa die ventralen „inneren" und die dorsalen „äußeren" Kiemen).

Die embryonale Anlage der Lungen erscheint an der ventralen Wand des Vorderdarms als einfache mediane Ausstülpung, bei Ceratodus „etwas rechts von der Medianebene" (Greil); bei Polypterus wächst sie caudalwärts in paarige Blindsäcke aus, von denen der rechte sich beträchtlich rascher und größer ausbildet; auch nach vorn von der Glottis erstrecken sich paarige hornförmige Fortsätze. Die Anlage der Schwimmblase erscheint als Einsenkung der dorsalen Schlundwand, ihr hinterer Teil schnürt sich vom Darm ab und wird zur Schwimmblase, der vordere zum Luftgang. Auch die Schwimmblasenanlage erscheint bald nach rechts (Amia, Rhodeus, Cyprinus), bald nach links (Salmo, Gymnarchus) etwas verschoben (Greil). Diese Befunde erscheinen nicht hinreichend, um, zugunsten der Annahme einer Homologie der Lungen und Schwimmblasen, das Argument ihrer typischen Lageverschiedenheit zu entkräften; nach Boas sollten die Lungen aus Schwimmblasen entstanden sein, indem diese sich längsspalteten, wonach die Hälften, um den Darm wandernd, ventral wieder zur Vereinigung gelangten; nach Sagemehl, dem neuerdings Goette beipflichtet, entspräche die Lunge von Polypterus der Urform, deren Weiterbildung einerseits zu den Lungen der Landwirbeltiere, andererseits durch Wanderung dorsalwärts und Rückbildung der linken Hälfte zu dem Zustand der Schwimmblase führte.

Lungen. Die Lungen sind meist paarige Säcke, glattwandig bei den Crossopterygiern, alveolär bei den Dipnoern. Im letzteren Falle darf als sicher, im ersten als sehr wahrscheinlich gelten, daß sie, sei es zeitweilig (Sommerschlaf von Protopterus), sei es dauernd, als supplementäre Luftatmungsorgane dienen. Sie erhalten bei Protopterus Blut aus der Aorta, bei Ceratodus und Polypterus aus dem IV. abführenden Kiemengefäß (vgl. „Kreislauforgane"), also stets solches, das bereits die Kiemenkapillaren passiert hat.

Schwimmblase. Die Schwimmblase erscheint meist als unpaarer, bisweilen durch Einschnürungen in mehrere hintereinanderliegende Abteilungen gesonderter Sack, selten mit Andeutung ursprünglich paariger Beschaffenheit (Holostei, Gymnarchus). Bei manchen Sciaeniden ist sie durch seitliche Blindsäcke vermannigfaltigt.

Von der Regel der dorsalen Einmündung in den Darm weichen Macrodon, Lebiasina und Erythrinus, mit links mündendem Luftgang, ab; geringere Verschiebungen der Mündungsstelle nach links oder rechts sind nicht selten (Rowntree, Trans. Linn. Soc. (2) Vol. 9, 1903). Bei einigen Clupeiden und Characiniden mündet der Luftgang in den Magen (Fig. 34); bei Clupeiden besteht außer der Kommunikation mit dem Vorderdarm eine Oeffnung nach außen hinter dem After. Die Mehrzahl der Teleosteer („Physoclisten") verliert den offenen Luftgang; nach Moreau erhält die Schwimmblase von Caranx eine Oeffnung in die rechte Kiemenhöhle; bisweilen schwindet die Schwimmblase ganz, so bei Bodenformen (Symbranchii, Pleuronectiden), aber auch bei manchen der besten Schwimmer (Scomber, Thynnus, Ammo-

Digitized by Google

dytes). Den Elasmobranchiern scheint sie selbst in Spuren zu fehlen; die Bedeutung einer dorsalen und paariger ventraler Schleimhauttaschen im Schlund von Mustelus (P. Mayer, Mitt. d. zool. Stat. Neapel Vol. 11, 1894) ist fraglich.

Die Wand der Schwimmblase ist in der Regel eben, mit glatten Muskelfasern versehen und von dünnem Epithel ausgekleidet; nur an gewissen reich vascularisierten Stellen verdickt sich das Epithel, bisweilen Tubuli bildend, zur sogenannten „Gasdrüse"; man nimmt an, daß diese das Schwimmblasengas liefert, doch kommen den meisten Physostomen (Salmoniden, Cypriniden) diese „roten Körper" nicht zu, sondern nur denen mit fast unwegsamem Luftgang (Esox, Anguilla), eigentlich drüsige nur den Physoclisten. Die Gasentleerung kann bei den Physostomen direkt geschehen; bei den Physoclisten soll das „Oval" (Corning 1888, Jäger 1903) oder eine besondere hintere Kammer (Syngnathus, Opsanus), Bezirke, an denen die Gefäße dicht unter dem zarten Epithel sich ausbreiten, die Resorption ermöglichen: das Oval kann durch eine muskuläre Ringfalte vom übrigen Schwimmblasenraum abgeschlossen werden, und zwar tritt dies ein, sobald die Vermehrung des Gasinhaltes (bei Zunahme des auf dem Fisch lastenden Drucks) notwendig wird (Woodland, Anat. Anz. Vol. 40, 1912). Das Blut gelangt zu der Gasdrüse durch einen Ast der Arteria coeliaca, doch ist derselben meist ein arteriell-venöses Wundernetz vorgeschaltet, das von den in das Drüsenepithel eindringenden Gefäßen mehr oder minder vollkommen gesondert bleiben kann (Anguilla, Syngnathus) und welches das Blut im Hin- und im Rückströmen (zur Pfortader) zu passieren hat. Das Oval bezw. die hintere Kammer, oder wo beide nicht ausgebildet sind (Salmo), der hintere Teil der Schwimmblase überhaupt, erhalten Blut aus der Aorta und geben es an die Cardinalvene ab.

Das Schwimmblasengas ist ein Gemenge von O, N und CO_2, in dem bei Physostomen der N überwiegt (ca. 87%), bei Physoclisten der O (Perca: 65%, Tiefseefische bis 80%!). Das frisch aus dem Blute abgeschiedene Gas enthält mehr O (80% nach Bohr) als nach längerem Verweilen in der Blase. Die Angaben, daß der O durch Zerstörung von Erythrocyten im Bereich der Gasdrüse verfügbar gemacht werde, werden bestritten (Woodland l. c.). Bei Asphyxie vermindert sich der O-Gehalt in der Schwimmblase; der Aal soll beim Aufenthalt auf dem Lande den O-Vorrat der Schwimmblase veratmen. — Die elastische Schwimmblase entspricht zu- und abnehmendem äußerem Druck durch Verkleinerung bezw. Ausdehnung; dabei nimmt auch das Volumen des Fischkörpers ab oder zu, so daß er im ersten Falle zu sinken, im letzteren zu steigen strebt. Bei wechselndem Druck, z. B. beim Uebergang in höhere oder tiefere Wasserschichten, vermag der Fisch daher sein Gleichgewicht mit dem Wasser nur zu bewahren durch aktive Erhaltung seines normalen Schwimmblasenvolumens, also durch Gassekretion bezw. -resorption, Gasabgabe nach außen, oder auch vermittelst der Muskulatur der Schwimmblasenwand; durch erstere Mittel kann natürlich nur langsam (im Verlauf mehrerer Stunden) eine Anpassung an veränderte Druckverhältnisse erzielt werden. Druckverminderung löst im allgemeinen reflektorisch Schwimmbewegungen, die den Fisch nach unten, Drucksteigerung solche, die ihn nach oben zu bringen geeignet sind, aus; man hat daraufhin die Schwimmblase als Vermittelungsapparat von Reizen, als „Sinnesorgan", angesprochen, wodurch dem Fisch das Verweilen in der ihm bionomisch angemessenen Wasserzone ermöglicht werde (Baglioni, Zeitschr. f. allg. Phys., Vol. 8, 1908).

In mehreren Familien zeigt die Schwimmblase Beziehungen zum Gehörorgan; entweder derart, daß vordere Ausläufer sich nur häutig verschlossenen Oeffnungen der knöchernen Labyrinthkapsel (Serranidae, Sparidae, Gadidae) oder Auswüchsen des Utriculus (Clupeiden) anlegen, oder vermittelst einer Reihe beweglich verbundener, von den vordersten Wirbeln abgegliederter Knöchelchen, des „Weberschen Apparats" (Siluridae, Gymnotidae, Characinidae, Cyprinidae). Von diesen Knöchelchen ist das größte (Tripus = Rippe des 3. Wirbels) mit der dorsalen Schwimmblasenwand und andererseits durch Ligament mit einem Knöchelchen (Scaphium = Neuralbogen des 1. Wirbels) verbunden, das eine Oeffnung in der Wand eines unpaaren perilymphatischen Sinus verschließt; so können Volumänderungen der Schwimmblase Bewegungen der Perilymphe, indirekt wohl auch der Endolymphe, verursachen (Bridge und Haddon). Dabei verliert die Schwimmblase unter Umständen ganz ihre hydrostatische Bedeutung und verharrt nur in Form kleiner paariger, bis auf einen dicht der äußeren Haut anliegenden Bezirk völlig von Knochenhülsen umschlossener Säckchen (Loricariiden, Cobitiden); so wird sie in der Tat ausschließlich zu einem Druckschwankungen dem Labyrinth übermittelnden Organ (Bloch, Jenaische Zeitschr. f. Nat., Vol. 34, 1900).

In gewissen Fällen dient die Schwimmblase als Luftatmungsorgan, so bei Lepidosteus, Amia, Gymnarchus, Erythrinus, Sudis (vgl. auch unten „Kreislauforgane"!). Direkte Luftaufnahme mag auch bei anderen Fischen mit sehr kurzem und weitem Luftgang (wie Heterotis) stattfinden. Für die Ansicht, daß die ursprüngliche Funktion auch der Schwimmblase die respiratorische gewesen sei, spricht u. a. der noch in großer Verbreitung anzutreffende zellige (alveoläre) Bau derselben (so außer den genannten bei Polyodon, Arapaima, Chirocentrus, Doras u. a. m.). — Bei einer großen Anzahl von Fischen übernimmt die Schwimmblase die Nebenfunktion eines Lautorgans, indem Einrichtungen ausgebildet werden, um ihren Gasinhalt in Vibration zu versetzen; dies geschieht, indem sich Teile der Rumpfmuskulatur

Digitized by Google

der Schwimmblasenwand anheften, entweder direkt (**Micropogon**, **Platystoma**) oder unter Vermittelung modifizierter sprungfederartiger Skelettstücke (**Auchenipterus**; vgl. **Bridge** und **Haddon**, Phil. Trans., Vol. 184, 1893). Auch als Resonator anderer Muskel- oder Reibungsgeräusche (**Balistes**) wird die Schwimmblase bisweilen zu einem Hilfsorgan bei den Lautäußerungen.

δ) **Eingeweide.** Der **Schlund** ist ein meist kurzes Rohr mit längsgefalteter Wand, ausgekleidet mit schleimzellenreichem Epithel und von quergestreifter Muskulatur umhüllt.

Magen. Der Magen stellt sich als Erweiterung des hintersten Vorderdarmteils dar, in deren Wand tubulöse Drüsen eingelagert sind. Er ist schlauchförmig, oft winklig geknickt, oder ein Blindsack, dessen Ein- und Ausgangsöffnung (Cardia und Pylorus) nahe beieinander liegen (Figg. 33, 34). Ein besonders muskulöser „Kaumagen“ findet sich bei der herbivoren **Heterotis**, einigen **Mugil** u. a. Der Magen fehlt den Dipnoern und den Holocephalen, unter den Teleosteern den Cypriniden (außer **Nemachilus barbatulus**), Labriden, Scariden, einem Teil der Gobiiden, Blenniiden u. a. (**Jacobshagen**, Jenaische Zeitschr. f. Nat. Vol. 47, 1911); meist also bei solchen, die Mikroorganismen aufnehmen oder bei denen die Nahrung schon durch einen ausgiebigen Kauakt vermittelst der Schlundzähne wohlvorbereitet wird. Bei den carnivoren Fischen wird die Nahrung unzerkleinert verschluckt und erst bei längerem Verweilen im Magen in eine breiartige Masse aufgelöst. Der Darmkanal der halbparasitischen Cyclostomen ist sehr einfach gebaut, ein Magen fehlt.

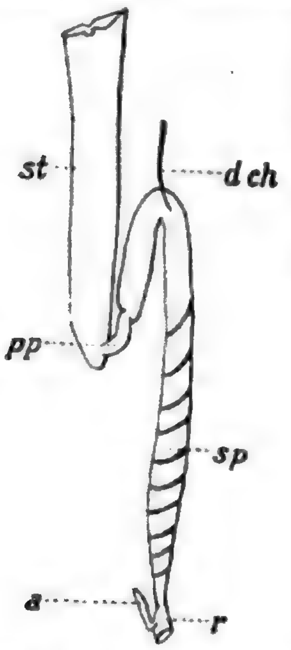


Fig. 33. Darmkanal von **Spinax niger**. st Magen, pp Pars pylorica desselben, d ch Ductus choledochus, sp Spiraldarm, r Enddarm, a fingerförmiger Anhang. Nach **Redeke** 1900.

Mitteldarm. Der Mitteldarm ist bei den Fleischfressern unter den Teleosteern ein kürzeres, bei Schlamm- oder Pflanzenfressern ein langes und entsprechend reich gewundenes Rohr. Besonders lang und in Spiraldrehungen gelegt ist er bei den Loricariiden (Fig. 35) und den phytophagen Characiniden (bei **Citharinus** 5mal so lang wie der Körper). Bei den Elasmobranchiern erfährt er regelmäßig eine spiralige Drehung; die dieselbe zum Ausdruck bringenden Windungen schließen aber fest aneinander und das Peritoneum zieht glatt über sie hinweg, sodaß dieser Darmabschnitt als dickes, äußerlich gerades, innen von einer **Spiralfalte** oder **-klappe** durchsetztes Rohr („Spiraldarm“) erscheint. Bei einigen Haien (Fig. 33) und vielen Rochen ist die Spiralfalte auf den hinteren Darmteil beschränkt. Wohlausgebildete Spiralklappen haben auch die Dipnoer, Chondrosteer und Crossopterygier, rudimentäre die Holosteer und Petromyzonten. Ob ihnen die spiraligen Schleimhautfalten von **Chirocentrus** und anderen Teleosteern (Salmoniden, Clupeiden) an die Seite zu stellen sind, ist fraglich. Der hinterste Abschnitt des Mitteldarms ist oft leicht erweitert und durch eine von der Schleimhaut gebildete Ringfalte vom vordern geschieden („Ampulle“ **Pilliets**).

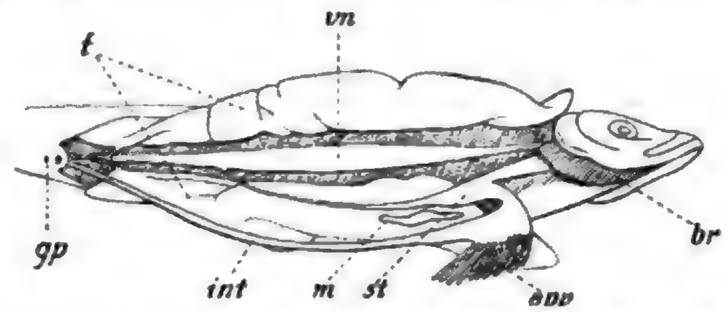


Fig. 34. Eingeweide von **Clupea harengus**; br Kiemen, st Magen, hinten in den Ductus pneumaticus übergehend, int Mitteldarm, app Pförtneranhänge, m Milz, vn Schwimmblase, t Hoden, gp Geschlechtsöffnung, davor der After.

Die Darmschleimhaut bildet meist netzartig untereinander verbundene Falten. Längs- und Ringmuskeln (ausnahmsweise, bei magenlosen Cypriniden und Plattfischen, quergestreifte) sind vorhanden. In den Beginn des Mitteldarms münden bei den Teleosteern meist (nie bei den magenlosen!) kurze Blindschläuche, **Appendices pyloricae** (Fig. 34 app.), in mehr oder minder hoher Zahl (bis ca. 800, bei **Merlangus carbonarius**); bei **Meletta** und **Chatoëssus** erstrecken sie sich, in metameren Gruppen, über einen längeren Darmbezirk. Den Elasmobranchiern fehlen sie (mit Ausnahme von **Laemargus**); in Rudimenten kommen sie den Crossopterygiern, wohl ausgebildet (aber um einen oder wenige Ausmündungskanäle gruppiert und äußerlich zu einem kompakten Körper verbunden),

Digitized by Google

den Stören und Lepidosteus zu. — Selten findet sich ein Kranz von kurzen Blinddärmen am Ende des Mitteldarms (Box).

Der Mitteldarm funktioniert bei den Cobitiden, Callichthys, Monopterus u. a. nebenher als Luftatmungsorgan; in diesem Falle dringen Kapillaren bis dicht unter die Epitheloberfläche vor. Die Atemluft wird durch den Mund aufgenommen und durch den After entlassen. Einen ähnlichen Funktionswechsel erfährt der Magen bei gewissen Loricariiden (Fig. 35); bei den gymnodonten Plectognathen

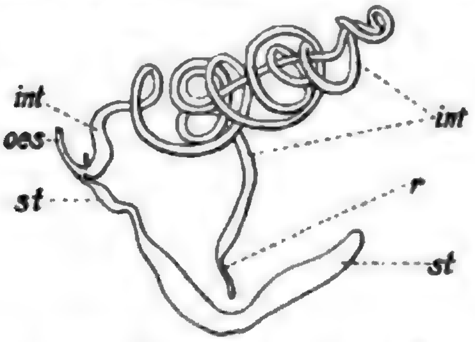


Fig. 35. Darm von Otocinclus. int Mitteldarm, st Magen, r Enddarm, oes Oesophagus.

(„Kugelfische") wird er zu einem über die ganze Bauchfläche sich ausdehnenden aufblasbaren Luftsack; gefüllt zwingt er den Fisch auf dem Rücken zu treiben, macht ihn aber durch die gleichzeitig bewirkte Spreizung der Hautstacheln für seine Feinde unangreifbar; zur Atmung hat er keine direkten Beziehungen.

Leber. Die Leber ist eine umfangreiche, in mehrere Lappen zerfallende Drüse, deren Ausführgänge in den Stiel der Gallenblase (Ductus cysticus) münden, der dann als Ductus choledochus in den Mitteldarm, nahe hinter dem Pylorus, bei den Teleosteern vor, zwischen, hinter den Pförtneranhängen oder (Naseus) in einen von diesen, mündet. Die Leber der Fische ist eine netzig-tubulöse Drüse; diejenige von Ceratodus weist im feineren Bau Aehnlichkeit mit der Amphibienleber auf (Bluntschli). Die Leber der Petromyzon-Larven ist von sehr einfachem Bau, aus verzweigten Tubuli bestehend; bei der Metamorphose degeneriert sie, die Gallengänge, Gallenblase und der Mündungskanal in den Darm gehen verloren.

Pankreas. Das Pankreas, wohl allgemein vorhanden, ist entweder kompakt oder es besteht aus zerstreuten, dem Mesenterium eingelagerten und dem Lauf der Gefäße folgenden, oft in das Lebergewebe eingebetteten Follikeln. Bei Protopterus ist die Bauchspeicheldrüse in die Darmwand selbst eingelagert; ähnlich bei Petromyzon, doch scheint dies pankreasartige Organ mehr den „Langerhansschen Inseln", die auch bei den Fischen im Pancreasgewebe nachgewiesen sind, zu entsprechen (Oppel).

Enddarm. Der Enddarm der Teleosteer ist vom Mitteldarm oft nur undeutlich geschieden. Bei den Elasmobranchiern nimmt er einen kurzen Blindschlauch („fingerförmiges Organ", Fig. 33) auf.

After. Der After liegt meist am hinteren Ende der Leibeshöhle, am Beginn des als Schwanz bezeichneten Körperabschnittes. Ausnahmsweise, so bei Fierasfer, der ein gleichsam sessiles Leben im Enddarm der Holothurien führt, bei Gymnotus electricus, wo die zum hauptsächlichen Bewegungsorgan gewordene Analis eine ungewöhnliche Ausdehnung beansprucht, wieder aus anderen Gründen bei den Amblyopsiden (s. u. bei Brutpflege!), ist er bis an die Kehle nach vorn verlagert.

Ueber das Vorkommen einer „Kloake" s. unten S. 1088.

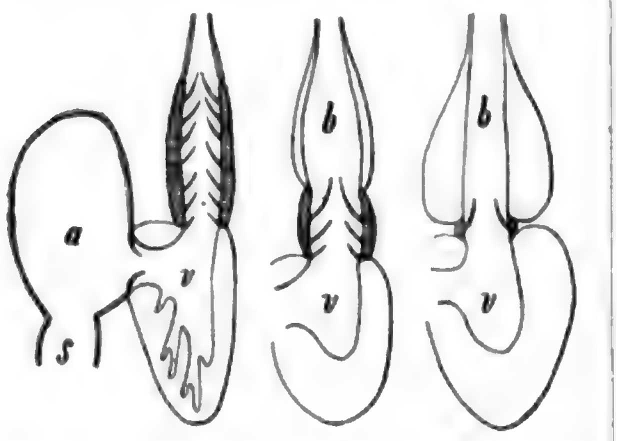
2h) Kreislauforgane. α) Herz. Die nutritorischen und respiratorischen Gefäßbezirke bilden bei den Fischen in der Regel ein einziges geschlossenes Kreislaufsystem (Fig. 37). Der einfache Herzvorhof (Atrium) empfängt das CO_2-reiche Körperblut aus dem Sinus venosus, dieser aus hinteren und vorderen Cardinalvenen, deren kurzem queren Verbindungsstück (Ductus Cuvieri) sich die Extremitätenvenen anschließen; das mit Assimilationsprodukten beladene vom Darm zurückströmende Blut gelangt zunächst durch die Pfortader in die Leber, von hier durch Lebervenen ebenfalls zum Venensinus. Auch die Niere hat meist ihren Pfortaderkreislauf, der ihr venöses Blut aus der Vena caudalis zuführt; sie gibt ihr Blut an die Cardinalvene ab.

Die Herzkammer ist, wie der Vorhof, einfach; nach vorn schließt sich ihr bei den Elasmobranchiern ein aus quergestreifter Muskulatur gebildeter, mit mehreren Reihen taschenförmiger Klappen ausgestatteter Conus arteriosus an; derselbe erhält sich, etwas vereinfacht, bei den Chondrosteern, Crossopterygiern (9 Klappenreihen bei Polypterus), Dipnoern und Holosteern, bei Teleosteern nur gelegentlich als eine (Osteoglossum, Notopterus) oder zwei (Butirinus) Klappenreihen einschließendes Rudiment (Fig. 36). Statt seiner findet sich bei Teleosteern, schwächer bei Holosteern, auch bei Cyclostomen, eine zwiebelförmige, nur mit glatten Muskelfasern ausgestattete Verstärkung des Aortenursprunges („Bulbus aortae").

Aus dem Conus bezw. Bulbus gelangt das (CO_2-reiche oder „venöse") Blut in die unter den Copulae verlaufende Aorta ascendens; dieselbe gibt eine den Bögen entsprechende Zahl von zuführenden Kiemengefäßen beiderseits ab, deren Zweige sich in den Fiedern der Kiemenblättchen auflösen; die sich sammelnden abführenden Kiemengefäße verbinden sich bei Te-

Digitized by Google

leostomen oberhalb der Kiemenbögen jederseits zu Längsstämmen; durch deren hintere Vereinigung zur Aorta descendens und durch eine vordere Querverbindung kommt meist ein sogenannter Circulus cephalicus zustande, von dem aus Arterien zu den Kopforganen (Arteria carotis int. und ext.) abtreten. Das abführende Gefäß des II. Bogens setzt sich gewöhnlich ventralwärts in eine Arterie zur unteren Mund- und Rachenwand und zum Herzen fort (Hypobranchialarterie). Bei den Selachiern entsprechen jedem Kiemenbogen 2 (mehrfach anastomosierende) abführende Gefäße, von denen das vordere jedes Bogens sich



a b c

Fig. 36. Längsschnitte durch das Herz a) eines Selachiers, b) von Amia, c) eines Teleosteers. Schematisch. a Vorhof, s Venensinus, v Ventrikel, b Bulbus aortae; der Conus schraffiert. Nach Boas.

mit dem hinteren des voraufgehenden jeweils zu einem Epibranchialgefäß verbindet, das hier in eine unpaare der Kopfregion angehörige Fortsetzung der dorsalen Aorta mündet (Fig. 37ao'). Bei Chlamydoselachus und den Holocephalen sind die abführenden Gefäße einfach, die Dipnoer dagegen bewahren sie doppelt; auch bei Teleosteern finden sie sich gelegentlich (Saccobranchus) teilweise verdoppelt. — Die Aorta descendens, unter der Wirbelsäule nach hinten, als Arteria caudalis bis ans Schwanzende verlaufend, gibt paarige Arterien an die Extremitäten, Nieren und Gonaden, unpaare (A. coeliaca, A. mesenterica) an den Darm und seine Anhänge ab.

Wo eine Hyoid- oder Opercularkieme funktioniert, empfängt sie ebenfalls „venöses“ Blut aus der Aorta ascendens (Elasmobranchier, Protopterus, Lepidosteus). Bei den Teleosteern bildet sich das entsprechende Gefäß (Arteria hyoidea), der zweite der 6 embryonal angelegten Aortenbögen, frühzeitig zurück; die vor dem Hyoidbogen veraufende Arteria hyomandibularis gewinnt Anschluß an das ventrale Ende des abführenden Gefäßes des I. Bogens und gibt den Zusammenhang mit dem Truncus arteriosus auf (Maurer); von ihr wird die Pseudobranchie mit

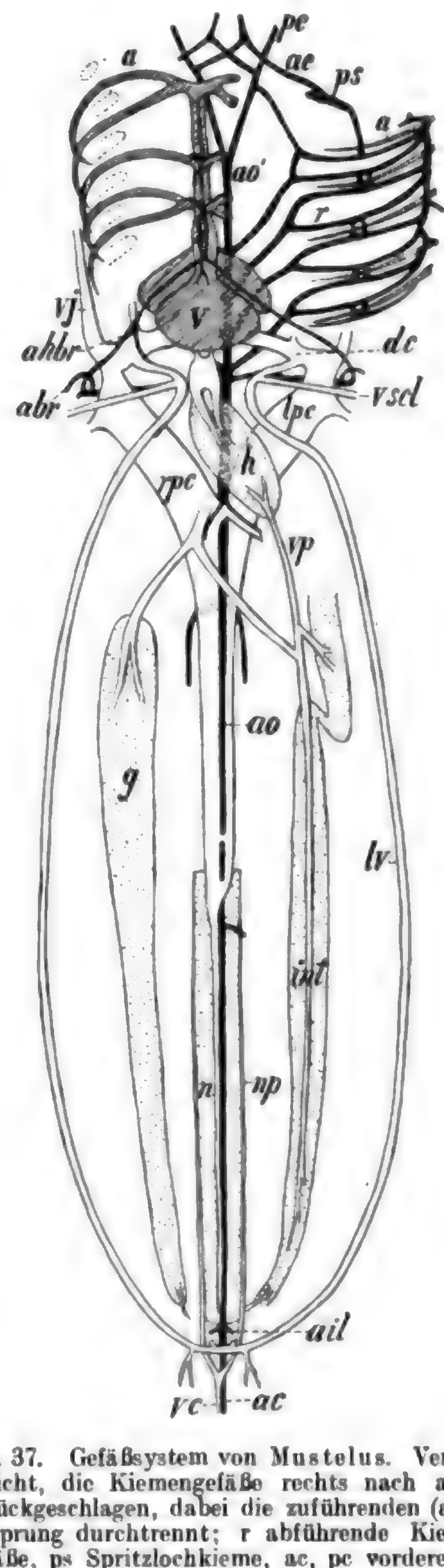


Fig. 37. Gefäßsystem von Mustelus. Ventralansicht, die Kiemengefäße rechts nach außen zurückgeschlagen, dabei die zuführenden (a) am Ursprung durchtrennt; r abführende Kiemengefäße, ps Spritzlochkieme, ac, pc vordere und hintere Carotis, ao, ao' Aorta, abr Arteria brachialis ahbr A. hypobranchialis, ail A. iliaca, ac A. caudalis; rpc, lpc rechte und linke hintere Cardinalvene, vj Jugularvene, dc Ductus Cuvieri, vp Pfortader, np Nierenpfortader, lv Lateralvene, int Darm, h Leber, n Niere, g Gonade. Venen hell, Arterien schwarz, Herz (v) und zuführende Kiemengefäße schraffiert. Nach Figuren von T. J. Parker.

Digitized by Google

Blut versorgt, doch erhält dieselbe oft zugleich einen Ast vom Circulus cephalicus, oder es bleibt nur diese letztere Verbindung bestehen (Esox); von der Pseudobranchie gelangt das Blut durch die Arteria ophthalmica magna nur zur Chorioidealdrüse des Auges und durch diese zur Chorioidea. In ähnlicher Weise empfängt die Spritzlochkieme der Selachier arterielles Blut von der vordersten Halbkieme her; ihr abführendes Gefäß, obwohl es auch einen Ast zum Auge sendet, kommuniziert aber mit den inneren Carotiden. Die Schwimmblase erhält arterielles Blut meist aus der Aorta (durch die Arteria coeliaca und Intercostalarterien, vgl. o. S. 1082), bei Amia vom IV. abführenden Kiemengefäß; sie gibt es hier an die Vena hepatica ab. — Bei Polypterus sind trotz Vorhandenseins der Lunge alle Kiemenbögen mit respiratorischen Wundernetzen ausgestattet; das IV. abführende Gefäß, mit dem III. kommunizierend, sendet die Arterie zur Lunge. Das Lungenblut kehrt durch paarige Venen, die nahe dem Sinus venosus in die Lebervenen münden, zum Herzen zurück. Die Außenkieme empfängt venöses Blut aus einem dem zur Operkularkieme gehenden ähnlichen Gefäß (Arteria hyoidea).

Eine Sonderstellung nehmen die Dipnoer ein, da bei ihnen das in der Lunge mit Sauerstoff angereicherte Blut durch eine Pulmonalvene in die durch ein wulstiges Septum von der rechten, in welche der Sinus venosus mündet, unvollkommen geschiedene linke Vorhofhälfte geführt wird. Auch im Conus bleiben die Blutsorten durch ein aus einer vergrößerten Klappenreihe gebildetes Längsseptum so geschieden, daß den vorderen Kiemenbögen mehr arterielles, den hinteren venöses Blut zugeführt wird. Ersteres geht bei Protopterus (Fig. 38) durch die der respiratorischen Wundernetze entbehrenden Bögen I und II direkt zur Aorta; letzteres gelangt hierhin bezw. in die Lungenarterie erst nach Passierung der inneren und äußeren Kiemenblättchen. So ergibt sich hier ein unvollkommener doppelter Kreislauf. Ein unvollkommenes Vorhofseptum findet sich auch bei Chimaera (Ray Lankester, Trans. Zool. Soc. 1879).

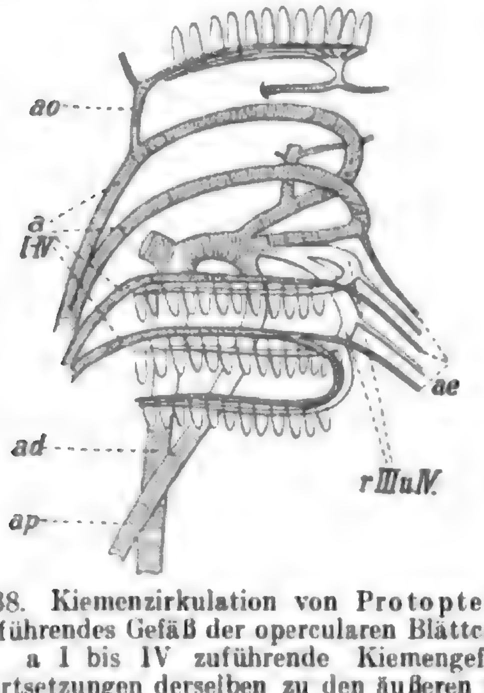


Fig. 38. Kiemenzirkulation von Protopterus. ao zuführendes Gefäß der opercularen Blättchenreihe, a I bis IV zuführende Kiemengefäße, ae Fortsetzungen derselben zu den äußeren Kiemen; r III und IV abführende Kiemengefäße (doppelt, nach neueren Befunden); ad dorsale Aorta, ap Pulmonalarterie. Nach Peters 1845.

Hinneigungen zur Sonderung eines eigenen respiratorischen vom Körperkreislauf finden sich ferner bei verschiedenen Teleosteern mit akzessorischen Luftatmungsorganen. So erhält das Kiemenlabyrinth der Osphromeniden Blut aus den abführenden Gefäßen des I. und II. Bogens und entsendet es, oxygenisiert, durch die Jugularvenen direkt zum Herzen (Henninger, Zool. Jahrb., Abt. f. Anat., Vol. 25, 1907); ganz ähnlich sind der respirierende Rachenbezirk von Ophiocephalus und die Atemsäcke von Amphipnous in den Kreislauf eingeschaltet; wobei sich, bei letzterem weitergehend als bei ersterem, durch Unterdrückung der Kiemenkapillaren echte „Aortenbögen" ausbilden (Hyrtl). Bei Otocinclus gelangt von dem als Lunge dienenden Magen, bei gewissen Erythrinus und bei Sudis von der zelligen Schwimmblase (Jobert, Ann. Sc. nat. (6), Zool., Vol. 5 u. 7) arterielles Blut direkt zum Herzen. Bei Gymnarchus erhält die Schwimmblase Blut aus dem III. und IV. (nicht an der Bildung der Aortenwurzeln beteiligten) abführenden Kiemengefäß; das aus ihr durch eine Vene zurückgeführte arterielle Blut soll in der linken Herzhälfte von dem aus dem (rechten) Ductus Cuvieri zugeführten venösen gesondert bleiben (Assheton).

Das Herz der Fische wirkt vorwiegend als Druckpumpe; da aber schon beim Passieren der Kiemenkapillaren, (die zwar an Feinheit denen der Lungen nachstehen), die dem Blute erteilte Beschleunigung teilweise verbraucht wird, so sind verschiedene andere Faktoren in den Dienst der Blutbewegung gezogen: die durch die Herzkontraktionen hervorgerufenen Druckverminderungen im Perikard, die ansaugend auf das Venenblut wirken sollen, die Atembewegungen u. a. (vgl. Schönlein, Zeitschr. f. Biologie 1896, Kolff, Arch. ges. Phys. Vol. 122, 1908). — Die Blutkörperchen sind stets kernhaltig, bei den Cyclostomen kreisrund, sonst oval, 0,005 bis 0,023 mm groß. Die Arterialisierung des Blutes erfolgt normalerweise in den Kiemenblättchen durch Diffusion des im Wasser gelösten Sauerstoffs. Das O-Bedürfnis der Fische ist im allgemeinen sehr gering; nach Winterstein (Arch. ges. Physiol. Vol. 125, 1908) vermag Leuciscus noch bei einem O-Druck von 2,2% Atm. (einem O-Gehalt von 0,7 ccm pro Liter entsprechend) zu leben, erträgt aber durchaus nicht völlige O-Entziehung; gegen Zunahme des CO_2-Druckes sind Fische sehr empfindlich. Mark (Bull. Mus. Comp. Zool. Vol. 19, 1890) vertritt nach Studien an Lepidosteus die Ansicht, daß die Schwimmblase hier wesentlich der O-Versorgung, die Kiemen der CO_2-Abscheidung dienen.

Digitized by Google

β) Lymphgefäßsystem. Auf das Lymphgefäßsystem kann nicht näher eingegangen werden; es steht mit dem Venensystem meist ausgiebig in offener Verbindung. Bei den Cyclostomen scheinen besondere Lymphgefäße ganz zu fehlen, die Venen treten mit weiten Sinus direkt in Verbindung (Mozejko); angesichts der embryologisch nachgewiesenen Entstehung des Lymphgefäß- aus dem Venensystem darf dieser Zustand wohl als Entwickelungshemmung betrachtet werden. Bei Selachiern kommen, nach P. Mayer, in der Haut konstante Lymphbahnen nicht vor, desgleichen keine besonderen Chylusgefäße am Darm; der Chylus wird von Venen aufgenommen, die sich streckenweise durch besondere Sphincteren von der allgemeinen Zirkulation abschließen können. Lymphherzen finden sich im Schwanz vieler Teleosteer (Favaro); auch die Atembewegungen sollen den Uebergang der Lymphe aus den Kopfsinus in die Jugularvenen beeinflussen (Jossifov).

Die Milz findet sich in der Regel in der Nähe des Magens; bei den Elasmobranchiern zerfällt sie oft in mehrere Portionen; bei den Dipnoern und Cyclostomen ist sie nicht als besonderes Organ individualisiert, sondern wird durch lymphoides Gewebe in der Darm- bezw. Magenwand selbst vertreten.

2i) Cölom und Urogenitalsystem. *α)* Körperhöhlen. Als Körperhöhlen sind zu unterscheiden die das Herz einschließende Pericardialhöhle und die abdominale, eigentliche Leibeshöhle. Ein Zwerchfell fehlt. Bei den Myxinoiden und beim Stör steht das Perikard mit der Abdominalhöhle in offener Verbindung. Bei gewissen Selachiern (meist, aber nicht ausschließlich, solchen ohne offene Nephrostomen, s. u.), den Holocephalen, Ceratodus, den Ganoiden, sowie einigen Teleosteern (Salmoniden, Mormyriden), kommen porenförmige Durchbrechungen der Leibeswand nahe der Urogenitalöffnung vor: die Bedeutung dieser „Abdominalporen" ist ungewiß.

β) Exkretionsorgane. Nieren. Die Exkretionsorgane sind bemerkenswert durch das häufige Bestehenbleiben mehr oder minder umfangreicher Teile der sogenannten Vorniere; das hauptsächliche Exkretionsorgan ist die Urniere.

Die Urniere der Selachier, deren vorderer Teil als sogenannte Geschlechtsniere zum Hoden in Beziehung tritt, besitzt gewöhnlich Kanälchen mit ins Cölom sich öffnenden trichterförmigen Mündungen. Nephrostomen (Ausnahmen: Carcharias, Mustelus, Raja u. a.). In jedem Falle treten die Kanälchen zu Malpighischen Körperchen in Beziehung, die einen arteriellen Gefäßknäuel (Glomerulus) umschließen. Die segmentale Anordnung wird im definitiven Zustande aufgegeben. Die Vorniere tritt nur in rudimentärer Form auf. Die Harnleiter münden in eine Kloake.

Bei den Teleosteern ist die Vorniere oft völlig degeneriert; sie besteht aber dauernd bei Fierasfer (Emery), Dactylopterus, Zoarces und Lepadogaster. Auch die Urniere, an der ein vorderer, mittlerer und hinterer Abschnitt unterschieden wird, kann sich postcardial bedeutend entfalten (Cypriniden, Siluriden). Offene Trichter kommen nie vor; bisweilen schwinden selbst die Urnierenglomeruli (Lophius, nach Audigé), es kann in solchem Falle der Vornierenglomus zum funktionell (als Filtrationsapparat) wichtigsten Teil der Niere werden (mehrere Lepadogaster-Arten, nach Guitel); die Seenadeln haben nur rechts wenige blind geschlossene Harnkanälchen, keinen Glomus oder Glomeruli (Huot). — Die Harnleiter vereinigen sich meist zu einer Harnblase, deren Ausführgang (Urethra) hinter den Gonoducten, meist getrennt von diesen und dem Darm, ausmündet.

Bei den Chondrostei, Holostei und Crossopterygii wird eine geringe Zahl von Vornierenkanälchen angelegt (8 bis 11 bei Amia, 5 bei Polypterus, von denen sich 2 lange erhalten), deren Trichter bald ins Cölom, bald in eine besondere Vornierenkammer münden. Calamoichthys bietet den Fall des Nebeneinanderbestehens von Vor- und Urnierenkanälen in einigen Leibessegmenten; gewöhnlich sind sie durch einen kleineren oder größeren Zwischenraum voneinander getrennt. Offene bewimperte Nephrostomen der Urniere bestehen bei den Stören und bei Amia. — Bei den Dipnoern werden jederseits 2 Vornierentrichter angelegt, die in eine vom Cölom unvollkommen gesonderte Vornierenkammer münden. Die Urnierenkanälchen haben keine offenen Nephrostomen; die Harnleiter münden hier in eine Kloake, unabhängig von ihnen ist eine „Harnblase", die vielleicht dem fingerförmigen Blindsack der Selachier homolog ist. — Bei den Petromyzonten werden 6 Vornierenkanälchen angelegt (im 4. bis 9. Segment), doch deutet die Entstehungsweise des Vornierengangs von der Splanchnopleura aus auf eine ursprüngliche Erstreckung dieses Systems weiter caudalwärts; die Kanälchen gehen nach Ausbildung der Urniere (bei der Larve) zugrunde; die Urnierenkanälchen beginnen blind mit Malpighi-schen Körperchen; die Vor- bezw. Urnierengänge münden zunächst in den Enddarm, im definitiven Zustand hinter diesem in den Urogenitalsinus. Bei den Myxinoiden erhalten sich dauernd Reste der Vorniere, deren Trichter sich ins Pericard öffnen. Die Anlagen der Vorniere reichen bei Bdellostoma anfänglich bis vor die

Digitized by Google

Kiemenregion, später bilden sie sich im Bereich der letzteren zurück, immerhin erinnert dies embryonale Verhalten an den bei Amphioxus permanenten Zustand (vgl. Bd. I S. 362).

γ) Urogenitalsystem. Hoden. Ovarien. Die Fische sind in der Regel getrenntgeschlechtlich. Hoden oder Ovarien liegen entweder frei, der dorsalen Cölomwand angeheftet oder sie bilden sackförmige Hohlorgane. Ersteres gilt für die Elasmobranchier, deren Hoden ihren Inhalt durch die Kanälchen des vorderen Urnierenabschnitts (s. o.) entleeren, während die weit vorn liegenden Ovarien die Eier durch das ins Cölom mündende Ostium des Müllerschen Ganges (Ovidukts, s. u. S. 1090) nach außen entlassen (sie verhalten sich hierin also prinzipiell wie die Amphibien, s. Bd. I, S. 328). Stets (außer bei den Holocephalen) münden die Gonodukte mit den Harnleitern und dem Enddarm in einen gemeinsamen Raum, die Kloake. Bei Laemargus borealis fehlen in beiden Geschlechtern eigentliche Gonodukte; deren Stelle scheinen hier die Abdominalporen zu vertreten.

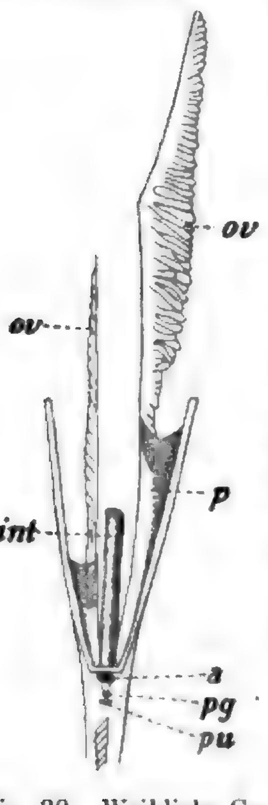


Fig. 39. Weibliche Geschlechtsorgane von Mallotus villosus. ov Ovarien, p Peritonealtrichter, int Darm, a After, pg Genital-, pu Urethralöffnung. Nach M. Weber, Morphologisches Jahrbuch, Vol. 12.

Unter den Teleosteern haben nur die Salmoniden, Galaxiiden, Muraeniden, und wenige andere freie Gonaden, deren Produkte durch mehr oder minder ausgebildete trichterartige Peritonealfalten zu den hinter dem After gelegenen Genitalporen (nicht Abdominalporen!) geleitet werden (Fig. 39). Bei der Mehrzahl gehen die langen sackförmig geschlossenen Ovarien nach hinten allmählich in Ovidukte, analog die Hoden (Fig. 34) in Samenleiter über, die, zu einem unpaaren Gang verschmolzen, hinter dem After, oft auf einer Urogenitalpapille, münden (die Beziehungen dieser Gonodukte zu denen der Selachier und Amnioten sind noch strittig; ontogenetisch zeigen sie keine Beziehungen zu den Nierensystemen; nach B. Haller wären die Peritonealtrichter der Salmoniden gleichwohl Müllerschen Gängen homolog). Nur ausnahmsweise (bei gewissen Loricariiden und bei Hippocampus) münden sie mit dem Darm und den Harnleitern gemeinsam, häufiger nur mit den letzteren vereinigt.

Von den Holostei hat Lepidosteus sackförmige, Amia freiliegende Ovarien; die trichterförmigen Ovidukte dieser und der Sturionen haben keine Beziehung zur Vorniere, sind also wahrscheinlich keine Müllerschen Gänge; die Hoden indessen bewahren die Verbindung mit dem caudalen Nierenabschnitt. Bei den Dipnoern verhält sich der Hoden ebenso, dagegen ist der Eileiter ein Müllerscher Gang (wie bei Selachiern). Der männliche Apparat von Polypterus nähert sich sehr dem der Teleosteer, der Samenleiter mündet erst in den Endabschnitt des Harnleiters; ähnlich verhält sich der kurze Ovidukt, dessen weites Ostium die ins Cölom fallenden Eier des freiliegenden Ovars aufnimmt. Die Gonaden der Cyclostomen sind unpaar, freiliegend, Eier und Spermien werden aus der Leibeshöhle durch Genitalporen, die in einen Urogenitalsinus münden, entleert.

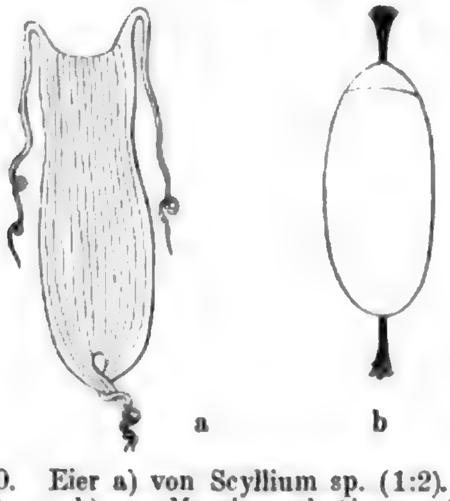
Wie im Mangel der Urogenitalverbindung, so stimmen Teleosteer und Cyclostomen in der Hinneigung zum Hermaphroditismus überein. In den Gonaden von Myxine kommen Eier und Spermien zugleich vor, doch sind stets überwiegend männliche oder weibliche Tiere zu unterscheiden; auch sterile kommen vor (Schreiner). Unter den Teleosteern ist Zwittertum konstant bei Serranus und Chrysophrys, häufig bei Pagellus, Box, Charax u. a., als Anomalie bei Gadus, Clupea, Scomber, Perca u. a. m. anzutreffen (M. Weber).

In der Regel werden die Eier frei ins Wasser abgelegt und in diesem befruchtet. Nicht wenige Fische aber sind vivipar, so viele Selachier (Mustelus, Carcharias u. a.) und Teleosteer (Zoarces, Clinus, Cyprinodonten, Embiotociden u. a.). Die Ernährung der Embryonen erfolgt bei jenen im erweiterten und mit Zotten versehenen hinteren Abschnitt des Eileiters (sogenannten Uterus), bisweilen vermittels placentaartiger, von dem gefäßreichen Dottersack ausgehender Bildungen („Dottersackplacenta"); bei den Teleosteern im Ovarialsack selbst, sei es innerhalb, sei es außerhalb der Follikel (Zoarces) durch von diesen gelieferte Nährflüssigkeiten (vgl. Stuhlmann, Abhandl. d. naturw. Vereins Hamburg, Vol. 10, 1887). Bei Lucifuga und Stygicola entstehen die Eier in Nestern von mehreren Hunderten; von diesen gelangt aber je nur ein Ei zur Reife, die übrigen degenerieren und werden von jenem bezw. dem Embryo als Nährmaterial verbraucht; es entwickeln sich gleichzeitig 2—15 Embryonen (Eigenmann und Lane 1909). — Die Elasmobranchier,

Digitized by Google

deren Eier stets im Eileiter befruchtet werden (auch bei den oviparen, mit einer Ausnahme, s. u.) besitzen stets Begattungsorgane, die in mehr oder minder engen Beziehungen zu den Bauchflossen stehen und mit akzessorischen Drüsen versehen sind. Bei den Teleosteern bestehen die Begattungswerkzeuge aus modifizierten Strahlen der Afterflosse (so bei Cyprinodonten, wo sie zur Uebertragung eines Spermapakets — Spermatophore — in die Geschlechtsöffnung des ♀ dienen) oder sie erscheinen als vergrößerte, oft ziemlich komplizierte Urogenitalpapillen (Clinus, Stygicola u. a.). Die Beteiligung der erektilen Afterflosse von Polypterus bei einem Begattungsakt wird vermutet, ist aber nicht erwiesen. — Weiteres über Begattungs- und über Brutpflegegewohnheiten siehe unter „Bionomie" (S. 1096).

3. **Embryologie.** 3a) Geschlechtsprodukte. Hinsichtlich der Größe, Dotterbegabung und Schutzeinrichtungen der Eier bestehen beträchtliche Verschiedenheiten. Sehr große und dotterreiche Eier, in geringer Menge, bringen die Selachier hervor (Fig. 40a); sie sind von mannigfaltig gestalteten hornartigen „sekundären" Schalen umschlossen, die von einem bestimmten Abschnitt des Eileiters, der Schalendrüse, geliefert werden. Nur Laemargus borealis legt kleine Eier ohne Hornschalen ab, die außerhalb des Körpers des ♀ befruchtet werden. Wo intrauterine Entwickelung statthat, sind die Schalen zart und gehen meist schon vor der Geburt zugrunde (Scymnus, Acanthias); zwischen dem Ei und der Hornschale befindet sich eine Eiweißschicht. — Die Eier der Ganoiden



a b

Fig. 40. Eier a) von Scyllium sp. (1:2). Nach Günther. b) von Myxine glutinosa (natürliche Größe). Nach Dean.

und Dipnoer sowie die der Petromyzonten sind klein und ziemlich dotterarm, die der Myxinoiden dagegen wiederum sehr dotterreich (2 bis 3 cm lang), von derber gelblicher Schale umgeben, an beiden Enden mit ankerförmigen, ihre wechselseitige Verbindung bewirkenden Fortsätzen versehen (Fig. 40b). — Die nur von der („primären") Eimembran umgebenen, meist kugeligen Eier der Teleosteer schwanken in der Größe meist zwischen 6 mm (Lachs) und 1 mm (Hering); die größten, von 17 bis 18 mm, dürfte Arius commersoni erzeugen. Im allgemeinen kann hier gelten, daß kleinere Eier in um so größerer Menge (beim Kabljau mehrere Millionen, bei größeren Süßwasserfischen immerhin mehrere Hunderttausend), sehr dotterreiche oder solche, die sich im mütterlichen Körper oder unter besonderer Pflege entwickeln, in geringer Zahl (1000 bis 2000 bei der Forelle, 60 bis 80 beim Stichling) hervorgebracht werden. Sie sind teils Grundeier, teils pelagische; in letzteren finden sich zur Verringerung des spezifischen Gewichts Oeleinschlüsse (Heringe, Plattfische u. v. a.), bei ersteren oft Einrichtungen zur Befestigung. Die Eimembran besitzt eine Oeffnung zum Durchtritt des Spermiums (Micropyle); nach der Befruchtung entsteht zwischen der Eimembran und der Eizelle ein mit Flüssigkeit erfüllter „perivitelliner Raum". Polyspermie kommt bei Teleosteern nicht vor, regelmäßig aber bei Plagiostomen und Holocephalen (vgl. den Artikel „Ei und Eibildung").

3b) Entwickelung. Die Verschiedenheit der ersten Entwickelungsvorgänge ist vorwiegend durch den verschiedenen Dottergehalt der Eier bedingt. Die Furchung ist partiell (discoidal) bei den Elasmobranchiern (mit Ausnahme von Cestracion und, nach Deans Auffassung, auch von Chimaera), Teleosteern, Holosteern und Myxinoiden, jedoch in ungleichem Maße; totale inäquale Furchung findet sich bei den Petromyzonten (Fig. 46), Acipenseriden und Dipnoern; total und in den ersten Stadien nahezu äqual ist sie bei Polypterus (Budgett-Kerr). — Bei den Plagiostomen liegt der umfänglichen Nahrungsdottermasse eine Keimscheibe von durchschnittlich 2 mm Durchmesser auf, welche die beiden Vorkerne enthält. Die ersten Blastomeren sind unvollkommen vom Dotter gesondert, später besteht das Blastoderm aus oberflächlichen Schichten von freien und einer tieferen Schicht mit dem Dotter zusammenhängender Blastomeren; zwischen ihnen entsteht die Furchungshöhle. Die Dottermasse enthält während dessen zahlreiche sehr große Kerne, teils ausgewanderte Blastodermkerne, teils Kerne überzähliger (nicht zur Befruchtung gelangter) Spermien, die nach vollzogener Befruchtung aus der Keimscheibe in den Dotter gedrängt werden und sich dort ganz analog der ersteren Art von Periblastkernen verhalten. An dem Blastodermrande, der dem Hinterende des werdenden Embryos

entspricht, erfolgt die Urdarmeinstülpung, die zur Bildung der in einen axialen Teil und in periphere Räume gesonderten **Gastralhöhle** führt (Fig. 41); sie sind dorsal vom eigentlichen Entoderm, ventral von der ungefurchten Dottermasse begrenzt, zwischen ihnen liegt der letzteren das (mit dem Entoderm zunächst fortlaufend verbundene

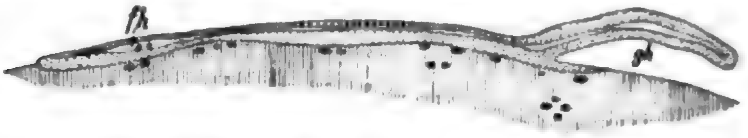


Fig. 41. Medianschnitt der Gastrula von Torpedo. fh Rest der Furchungshöhle, der sich noch auf dem in Figur 42 dargestellten Stadium als Blastocölknopf äußerlich bemerkbar macht; gh Gastralhöhle; Dotter bezw. Periblast schraffiert. Nach H. E. und F. Ziegler.

und ihm zuzurechnende) Dotterepithel dicht auf. Das Mesoderm wuchert entlang einer rinnenförmigen Einsenkung teils aus dem axialen Entoderm (Mesodermstreifen), teils aus dem peripheren aus. Median sondert sich aus ersterem die Chorda durch einen (wenig deutlichen) Faltungsvorgang aus. Ein nach der Chorda und unter dieser sich abschnürender Gewebsstrang, die Hypochorda, erinnert an die Epibranchialrinne des Amphioxus, dehnt sich aber allerdings weit über den respiratorischen Darmabschnitt nach hinten aus. Das Rückenmark (Medullarrohr) bildet sich durch deutliche Aufwärtsfaltung und dorsomediane Verlötung der Ränder der Medullarplatte; der dem Gehirn entsprechende Teil schließt sich oft erst nachdem schon die Ausstülpung der Augenblasen begonnen hat (Squalus). Durch mediane Verwachsung der das Hinterende der Medullarrinne flankierenden Schwanzlappen des Blastoderms über dem Blastoporus entsteht der Canalis neurentericus. Die Spinalganglien entstehen von die Ränder der Medullarplatte begleitenden Nervenleisten aus, von denselben auch die meisten Gehirnnerven (außer Oculomotorius, Trochlearis, Abducens und Hypoglossus, die nach Art der ventralen Wurzeln des Rückenmarks selbständig aus dem Medullarrohr auswachsen). Das axiale Mesoderm sondert sich in die metameren Urwirbel und die Seitenplatten, in welch letzteren die Leibeshöhle auftritt (Fig. 43); am oberen Rande derselben entstehen in der vorderen Körperregion wenige Kanälchen, die Vorniere repräsentierend. Ihre distalen Enden vereinigen sich zum Vornierengang; derselbe sondert sich später in 2 Gänge, den Müllerschen Gang, der mit dem durch Verschmelzung der inneren Vornierenmündungen entstandenen Ostium abdominale in Verbindung bleibt und beim ♀ als Oviduct dient, und den Urnierengang, der die aus dem Verbindungsstück von Urwirbeln und Seitenplatten (Nephrotom) hervorgegangenen Urnierenkanälchen aufnimmt; nur die letzteren erhalten Glomeruli und üben die Nierenfunktion aus; beim ♀ degenerieren die vordersten (1 bis 9) Urnierenkanälchen, beim ♂ treten sie als Nebenhoden zum Geschlechtsorgan als dessen ausführendes Kanalsystem in Beziehung. Die Urgeschlechtszellen liegen vornehmlich im proximalen Blatt der Seitenplatten (Splanchnopleura), später auf den „Keimdrüsenfalten“ jederseits neben dem dorsalen Mesenterium. Das Binde- und Skelettgewebe entstammt dem an der Grenze von Urwirbeln und Seitenplatten aus dem Mesoderm auswuchernden Mesenchym. Die Urwirbel (Myotome) geben wesentlich der Rumpfmuskulatur den Ursprung, in die Extremitätenanlagen entsenden sie Muskelknospen, aus denen die Flossenmuskulatur hervorgeht; das Verhalten dieser Knospen

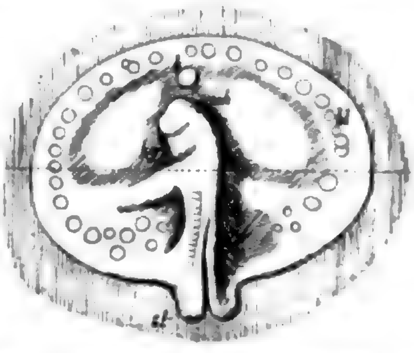


Fig. 42. Blastoderm von Torpedo mit vorgeschrittener Embryonalanlage. mh Mittelhirn, kg Kiemenregion, sl Schwanzlappen; das Medullarrohr ist hinten noch nicht geschlossen; k Blastocölknopf, bl Blutinseln. Nach Ziegler.

und das Auftreten eines modifizierten Epithelstreifs zwischen den Anlagen der Brust- und Bauchflossen sprechen für einen ursprünglichen Zusammenhang letzterer. Das Herz entsteht aus paarigen mesenchymatischen Anlagen; seine Muskulatur von der Splanchnopleura her. Das periphere Mesoderm bildet zunächst am Blastodermrande rundliche Verdickungen; diese „Blut-

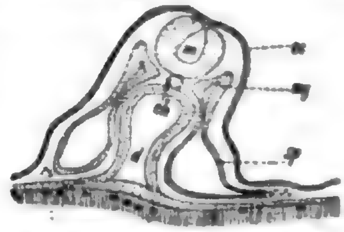


Fig. 43. Querschnitt durch den in Figur 42 abgebildeten Embryo in der durch die punktierte Linie markierten Ebene. ec Ektoderm, m Medullarrohr, ch Chorda, d Darmhöhle, my Myotom, sp Seitenplatten. Nach Ziegler.

inseln" (Fig. 42 bl) bilden sich in Gefäßwandungen und Blutkörperchen um und liefern das Gefäßnetz des Dottersackes; dieses empfängt Blut aus einer an der rechten Vorniere aus der Aorta entspringenden, vor dem Kopfe sich gabelnden Dotterarterie und sendet es durch zwei, nach vollständiger Umwachsung des Dottersacks durch das Blastoderm sich zu einer verbindende, in die Subintestinalvene mündende Dottervenen zum Herzen zurück; die Dottervene wird später zur Pfortader der Leber. Indem das gastrale sich von dem Dotterentoderm sondert, zieht sich das Verbindungsstück des Dottersacks mit dem Darm zu einem langen, hinter der Leberanlage in den Darm mündenden Dottergang aus; der im Cölom gelegene Teil dieses Gangs erweitert sich vorübergehend zu einem inneren Dottersack; von hier gelangt der Dotter in den Spiraldarm, wo er resorbiert wird. Bei Chimaera enthält der Dottersack nur einen Teil des Dotters, die Hauptmasse unterliegt einer Fragmentation, wird aufgelöst und vornehmlich durch die äußeren Kiemenfäden des Embryo (Fig. 44) aufgesogen (Dean).

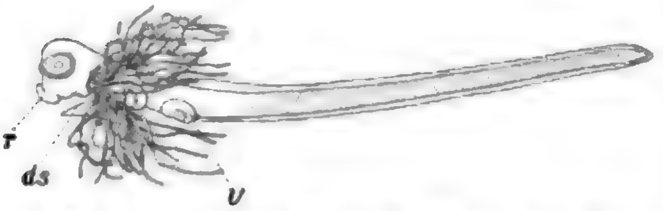


Fig. 44. Aelterer Embryo (6 cm) von Callorhynchus. ds Dottersack (abgeschnitten), r Rostrum, v Bauchflosse; die Brustflosse durch die Kiemenfäden zum Teil verdeckt. Nach Schauinsland.

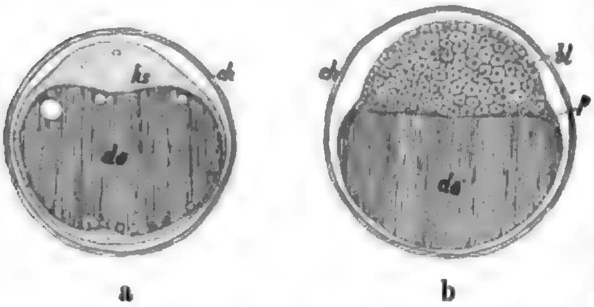


Fig. 45. Ei von Crenilabrus. A unbefruchtet, B $7^1/_4$ Stunde nach der Befruchtung. Schematisiert. ch Eimembran, do Dotter, ks Keimscheibe, bl Blastoderm, p Periblast. Nach J. H. List.

Auch bei den Teleosteern verdickt sich die zarte, die Dotterkugel einhüllende Plasmaschicht einseitig zu einer Keimscheibe (Fig. 45a, ks); in dieser allein spielt sich der Furchungsprozeß ab, der zu einer zunächst ein-, später mehrschichtigen Blastomerenplatte (Fig. 45b) führt, deren randständige Elemente mit dem Dotter in Verbindung bleiben, während die zentralen sich von ihm unter Bildung einer flachen Furchungshöhle abheben; hauptsächlich von den Randzellen aus findet die Bildung der Periblastkerne statt, die in einer mit dem Dotter ohne scharfe Grenze zusammenhängenden ungefurchten Plasmamasse liegen, sich hier unter Bildung mehrpoliger Mitosen oder amitotisch vermehren und nach bedeutender Größenzunahme endlich degenerieren. Das Blastoderm ist außen von einer flachen kernhaltigen „Deckschicht" überzogen, die am Rande in den „Keimwall" des Periblasts übergeht. Bei der sogenannten Gastrulation schlägt sich der hintere und mediane Teil des Blastodermrands nach innen gegen den Periblast ein, eine offene Einsenkung und eine Gastralhöhle entstehen nicht, die Deckschicht zieht glatt über die anzunehmende Invaginationsstelle fort. In Anbetracht der geringeren Größe der Dotterkugel erfolgt ihre Umwachsung auf viel früheren Stadien als bei den Selachiern. Das Rückenmark bildet sich durch Ausschaltung einer soliden Zellplatte aus dem Ektoderm, die erst nach ihrer Trennung von diesem, zuerst im Bezirk des primären Vorderhirns, ein Lumen gewinnt. Das Entoderm, die Chorda und das Mesoderm sondern sich durch Abspaltungsprozesse aus der invaginierten unteren Schichte des Blastoderms. Aus dem Entoderm bildet sich der Darmkanal, zunächst als solider Strang, der Periblast nimmt nicht daran teil; nur in der Gegend der Leberanlage bleibt der Darm mit der Dotterkugel unmittelbar in Berührung, doch wird in der Regel der Dotter nicht in den Darm aufgenommen, sondern durch die Dottergefäße resorbiert. Ein gestielter Dottersack entsteht nur ausnahmsweise bei dem — auch sonst sich in mancher Hinsicht aberrant (amphibienmäßig, nach Assheton) verhaltenden — Gymnarchus. Eine Lichtung im postanalen Darm und ein Canalis neurentericus treten nie auf; am Ende des ersteren erscheint frühzeitig, aber vorübergehend, eine Höhlung, die Kupffersche Blase. Die Urwirbel erhalten nie ein Lumen, im Kopfbezirk zeigt das Mesoderm nie Segmentation; vom unteren Ende der Ursegmente aus entstehen medialwärts die (mesenchymatischen) Sklerotome, die das skeletogene Gewebe liefern. Der Dottersack erhält Blut, das von der Vena subintestinalis zuerst der Leber zugeführt wurde, von dieser her; die Dottervene geht über die linke Seite des Dottersacks zum Sinus venosus. Im Bereich der vordersten Urwirbel (3. bis 7.) schnürt sich jederseits vom medialen Rand der Seitenplatten ein Divertikel ab, die Vornierenkammer, mehreren verschmolzenen

Digitized by Google

Vornierenkanälchen entsprechend; in dieselbe stülpt sich ein Glomus ein, der von einem Aortenast gespeist wird; die Vornierengänge schnüren sich von den Seitenplatten ab und münden auch hier zunächst in den Enddarm; ein Divertikel des letzteren, nahe ihrer Einmündung, bildet die Harnblase, die sich später vom Enddarm entfernt. Mit dem Vornierengang treten auch die Urnierenkanälchen in Verbindung; zur Abspaltung eines Müllerschen Gangs kommt es nicht; die Vorniere bildet sich in der Regel postembryonal zurück.

Von den Ganoiden schließt sich den Teleosteern zunächst Lepidosteus, dann Amia an. Bei letzterer durchschneiden einige Furchen (die 1. bis 3.) die Dottermasse. Bei der Gastrulation wird eine niedrige Urdarmhöhle sichtbar, hinsichtlich der Deckschicht des Blastoderms, der Periblastbildung, der soliden Anlage des Medullarrohrs usw. besteht naher Anschluß an die Knochenfische. — Die Acipenseriden und Dipnoer zeigen in den ersten Entwickelungsvorgängen ausgesprochene Hinneigung zum Verhalten der Amphibien. Die Eier des Störs sind bräunlich pigmentiert, mit mehreren Micropylen versehen und von einer dünnen Schleimhülle umgeben: hinter dem eindringenden Spermium bleibt (wie bei Amphibien) eine Pigmentbahn zurück, deren Verlauf die 1. Furchungsebene bestimmt. Die Zerklüftung der vegetativen Eihälfte ist unvollkommen. Die Blastula zeigt eine geräumige Furchungshöle; bei der Gastrula besteht eine zunächst halbkreis-, dann kreisförmig einen Dotterpfropf umschließende Blastoporusmündung. Das Medullarrohr bildet sich unter deutlicher rinnenförmiger Einsenkung der Medullarplatte; es besteht ein Canalis neurentericus, in dem eine Erweiterung an die Kupffersche Blase erinnert. Das Verhalten des Dottersackes ist ähnlich wie bei Teleosteern. — Bei Ceratodus scheint innere Befruchtung stattzufinden; die Eier haben eine im Wasser aufquellende Gallerthülle und sind am animalen Pol stärker pigmentiert; ebenso sind Furchung, Gastrulation und Mesodermbildung denen der Amphibien ähnlich. Die Eier von Lepidosiren sind dotterreicher, die ersten Entwickelungsvorgänge daher denen von Amia ähnlicher; das Medullarrohr wird solid angelegt, der Canalis neurentericus fehlt. — Das Ei von Polypterus (J. Gr. Kerr 1907) ist am animalen Pol stark pigmentiert, die Furchung total, adäqual; bei den Gastrulae ragt die Dotterzellenmasse knopfartig weit aus dem Blastoporus hervor. Das Mesoderm sondert sich vom Enteroderm durch Delamination; die Chorda wird entlang einer rinnenförmigen Einsenkung aus der dorsalen Urdarmwand ausgeschaltet; unter ihr erscheint eine vakuolisierte und mit einer dünnen Cuticula bekleidete Hypochorda. Ein langer postanaler Darm ist vorhanden, bleibt aber ohne Lichtung. Das Zentralnervensystem bildet sich durch deutliche rinnenartige Einfaltung der Medullarplatte, vor dem Schluß des Rohrs erscheinen bereits Andeutungen der Augenblasen und des Infundibulum. Frühzeitig erscheinen präorale Haftgruben, deren Epithel sich von Entodermdivertikeln herleitet; das Arteriensystem bildet zuerst den die ebenfalls sehr früh erscheinende Außenkieme versorgenden II. (hyoidalen) Aortenbogen aus.

Auch bei den Petromyzonten (Fig. 46 und 47) gleichen Blastula und Gastrula einigermaßen denen der Amphibien.

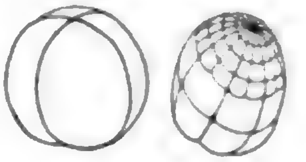


Fig. 46. Furchungsstadien von Petromyzon. Nach M. Schultze.

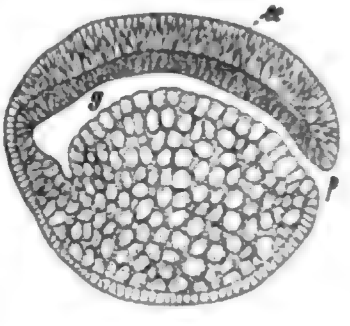


Fig. 47. Aeltere Gastrula von Petromyzon. g Gastralhöhle, p Blastoporus, ec verdicktes Ektoderm (Anlage des Medullarrohrs); das Entoderm ist punktiert. Nach A. Goette.

Das Medullarrohr aber wird solid angelegt und erhält erst später ein Lumen; Chorda und Mesodermstreifen sondern sich als einheitlicher Zellkomplex von der Urdarmwand ab: letztere erhalten frühzeitig einen Hohlraum, doch scheint eine Mesodermbildung von eigentlichen Urdarmdivertikeln aus (wie bei Amphioxus) nicht vorzukommen. Das Vorderende nimmt bald schlankere, das hintere durch Anhäufung des Dotters eine plumpe Gestalt an, die ausschlüpfenden Embryonen bezw. Larven gleichen auffallend denen von Ceratodus. — Im Ei der Myxinoiden liegt eine Keimscheibe unter der Micropyle, in der die Furchungen allein ablaufen und von der, wie bei den Teleosteern, die Bildung eines Periblasts ausgeht; eine Furchungshöhle tritt nicht auf, ebensowenig eine Urdarmhöhle. Die Umwachsung des Dotters durch das Blastoderm erfolgt rascher von dessen Hinterrand aus, an dem sich die Embryonalanlage bildet. Das Medullarrohr wird vorn hohl, hinten solid angelegt, eine Kupffersche Blase ist vorhanden, kein Canalis neurentericus. Die Bildung der Augenblase verläuft wie gewöhnlich, eine Linsenanlage tritt auf.

Digitized by Google

schwindet aber bald wieder. Die jungen Larven von ca. 4,5 cm besitzen noch einen großen Dottersack, sonst sind sie den erwachsenen Fischen ähnlich.

Ueber die Nierensysteme der Ganoiden und Cyclostomen siehe oben den anatomischen Abschnitt: ebendort finden sich jeweils andere Angaben zur Organogenie.

Die Selachier und Myxinoiden verlassen das Ei (bezw. den Uterus, bei den viviparen Arten) in sehr ausgebildetem Zustande. Bei den übrigen Gruppen pflegen die ausschlüpfenden Tiere noch mehr oder minder von den erwachsenen abzuweichen, denen sie also erst durch eine Metamorphose sich angleichen. Petromyzon planeri lebt 3 bis 4 Jahre als Larve (Ammocoetes, Querder), die von der erwachsenen Form durch die Bildung des Mundes, des Kiemenapparates, der Augen u. a. abweicht. Die kaulquappenähnlichen, noch einen großen Rest des Dottersacks enthaltenden Larven der Holosteer zeichnen sich u. a. durch einen fortlaufenden medianen Flossensaum und Haftorgane am Vorderende aus; bei denen der Störe entwickeln sich an der Stelle der Haftorgane später die Bartfäden. Die Larve von Polypterus (Fig. 48) besitzt ebenfalls die präoralen Haftgruben, trägt aber außerdem eine große kammförmige Außenkieme dicht hinter dem Spritzloch. Noch mehr sind die Dipnoerlarven (Fig. 49) denen der

Fig. 48. Larve von Polypterus. Vorderflossen am Grund aufgestützt. Nach Budgett.

Fig. 49. Larve von Protopterus. ex Brust- und Bauchflossen, h Haftorgan. Nach Budgett.

Amphibien ähnlich; die der Dipneumones haben 4 Paar gefiederter Außenkiemen, und brustständige Haftapparate (denen von Ceratodus fehlt beides). — Bei den Teleosteern treten positive Larvencharaktere seltener auf, so etwa äußere Kiemenfäden (vgl. oben S. 1080) bei Gymnarchus und Heterotis, kopfständige (präorale) Haftorgane (denen der Ganoidenlarven ähnlich) bei Sarcodaces und Hyperopisus (Budgett 1903). Veränderungen in der Form und Ausdehnung der Flossen, in der Beschaffenheit der Körperbedeckungen usw. sind indessen nicht selten; die seitlich stark komprimierten glashellen Larven der Aale (Leptocephali, Fig. 50) leben in der Tiefsee und

Fig. 50. Leptocephalus grassii. Nach Eigenmann und Kennedy.

verwandeln sich, während sie die Wanderung in die Flüsse (s. u.) vollenden. Aehnliche Larven kommen bei Albula (Malacopterygier) vor. Die pelagisch lebenden Larven der Plattfische sind symmetrisch; erst gegen das Ende des Larvenlebens wandert das eine Auge auf die im benthonischen Leben nach oben gekehrte Seite.

4. Bionomie. 4a) Wohnort. Lebensbedingungen. Die Fische bewohnen die süßen und salzigen Gewässer, im Meere bis gegen die Pole und in die größten Tiefen vordringend, in den Gebirgen bis zu fast 4000 m Höhe aufsteigend (südamerikanische Cyprinodonten). Weist so die Gesamtheit eine außerordentliche Mannigfaltigkeit des Aufenthalts und der Lebensweise auf, so zeigen die Gattungen und Arten sich einem bestimmten Lebenskreise (in der Art des Nahrungserwerbes und dem Verhältnis zu den jeweiligen physikalischen Bedingungen) meist derart angepaßt, daß ihrer Ausbreitung jenseits desselben feste Schranken entgegenzustehen scheinen.

α) Süß- und Salzwasser. Osmotischer Druck. Nach dem Wohnbezirk lassen sich Meeres- und Süßwasserfische sondern; unter jenen scheiden sich wieder Hochsee- und Tiefseefische von den bei weitem zahlreicheren Küstenfischen; unter diesen bildet die Bewohnerschaft stehender oder träge fließender schlammiger Gewässer, größerer Seen, der Bäche und Flüsse, jeweils besondere Charaktere aus. In beiden Gruppen lassen sich eigentlich nektonische oder pelagische Formen namhaft machen und solche, die den Aufenthalt nahe am Boden vorziehen (benthonische). Den größten Fischreichtum beherbergen die küstennahen Meeresteile. Die Elasmobranchier leben fast ausschließlich im Meere. Von den Teleosteern sind etwa zwei Drittel der Arten marin; die wichtigsten Familien, deren Mitglieder ausschließlich oder ganz vorwiegend im Süßwasser vorkommen, sind die Mormyriden, Osteoglossiden, Characiniden, Gymnotiden, Cypriniden, Siluriden, Symbranchiden, Esociden, also vorwiegend „altertümliche" Physostomen;

Digitized by Google

doch auch die Ophiocephaliden, Labyrinthici und Mastacembeliden sind hier zu nennen. Mit Ausnahme von Acipenser ganz aufs Süßwasser beschränkt sind alle Ganoiden und Dipnoer. Die Elasmobranchier haben ein mit dem Meerwasser isotonisches Blutserum (wobei der in diesem aufgespeicherte Harnstoff einen Teil des äußeren Salzdrucks trägt); bei den marinen Teleosteern ist der osmotische Druck des Blutserums stets geringer als der des umgebenden Mediums (Dekhuyzen, Bergens Mus. Aarbog 1905).

Nicht wenige Fische scheinen gegen den Wechsel von Salz- und Süßwasser gleichgültig. So vertauschen viele „Wanderfische" (s. u.) periodisch Meer und Binnengewässer; auch sonst dringen gelegentlich echte Meeresfische (Pleuronectiden, Tetrodon, einige Haie und Rochen) in die Ströme, Flußfische (Arius) ins Meer vor. Die Stichlinge (Gasterosteus aculeatus und pungitius) sind in Süß- und Salzwasser gleich heimisch. Aus derartigen weniger empfindlichen Formen setzt sich vornehmlich die Fischfauna des Brackwassers zusammen. Die salzarme Ostsee beherbergt neben echten Meeresfischen zahlreiche Einwanderer aus den Flüssen; indessen zeigen sich bei vielen Vertretern beider Gruppen Verkümmerungsmerkmale. Die Arten bezw. Gattungen einer Familie bekunden oft hinsichtlich der Wohnorte sehr verschiedene Neigungen. So kann man über die eigentliche „Heimat" der Salmoniden im Zweifel sein; denn einige wechseln periodisch zwischen Meer- und Süßwasser, andere sind ganz auf dieses, wieder andere auf jenes beschränkt, einzelne sind Tiefseeformen, Osmerus ist ein Brackwasserbewohner. Von der Gattung Coregonus lebt oxyrhynchus in der Ost- und Nordsee, steigt aber zum Laichen in die Flüsse auf, albula in finnischen, skandinavischen und niederdeutschen Seen, fera in tiefen Alpenseen, als eine geringfügig abgeänderte Varietät (lavaretus) auch in der östlichen Ostsee, maraena in dieser benachbarten Landseen; wartmanni und macrophthalmus finden sich im Bodensee, acronius und hiemalis nur in oberbayerischen Seen; man nimmt an, daß es sich bei den lacustrischen Coregonen um Relikte handelt, die während der Eiszeit von der Ostsee her ihre damals noch zusammenhängenden Wohngebiete erreicht haben (Thienemann). Von den besonders schmiegsamen Cyprinodonten leben viele in dürftigen Süßwasseransammlungen (Gräben u. dergl.), Anableps in den Aestuarien tropischer Flüsse, andere in abflußlosen Salzseen (Cyprinodon), sogar in bis 30° C warmen salzhaltigen Quellen.

β) Temperatur. Unter den das Wohngebiet bestimmenden physikalischen Faktoren ist der wichtigste die Temperatur. Ausgesprochene Warmwasserfische sind z. B. die Chaetodontidae, Labridae u. a., Kaltwasserfische die Salmoniden, Gadiden u. a. Aus der Gebundenheit an gewisse Temperaturzonen ergibt sich die meist viel größere ost-westliche als nord-südliche Ausbreitung der Arten; so sind die Esociden, Galaxiiden, Gasterosteiden je auf einen schmalen Breitengürtel beschränkt, der über die verschiedensten Stromgebiete quer hinweggeht. Die Tiefseefische leben dauernd bei einer Temperatur von wenig über 0°. Gewisse Küstenfische und Bewohner kleiner Binnengewässer sind starke Temperaturschwankungen zu ertragen fähig (eurytherm).

γ) Druck. Die Druckverhältnisse, unter denen die Tiefseefische und die Fische flacher Binnengewässer leben, sind ebenfalls enorm gegensätzlich; doch sind die Individuen rasche und ausgiebigere Druckveränderungen zu ertragen nicht imstande (am wenigsten die mit geschlossener Schwimmblase); vielmehr scheint jede Art an eine bestimmte Tiefenzone angepaßt zu sein und nur wenige sind imstande, größere und geringe Tiefen rasch zu vertauschen.

Licht. Auf das Licht reagieren die Fische teils durch ihr Farbenkleid (siehe S. 1059), teils durch Ausbildung der Sehorgane, in beiderlei Hinsicht eine strenge Abhängigkeit von den örtlichen Verhältnissen bekundend. Die Augen degenerieren regelmäßig bei den Höhlenfischen, während sie bei den Tiefseefischen sich meist in besonderer Weise umbilden (s. oben S. 1076); bei Bewohnern klarer und durchleuchteter Gewässer sind sie besser ausgebildet als bei denen trüben und schlammigen Wassers (Aale, Welse).

δ) Wanderungen. Die Wanderungen stehen meist in Beziehung zum Fortpflanzungsgeschäft. Die Störe (außer Scaphirhynchus), Neunaugen, Maifische, Lachse leben im Meere, laichen aber in Flüssen. Die Lachse (Salmo salar) beginnen im Frühjahr ihren Aufstieg in die Flüsse und erreichen die Oberläufe derselben zu Beginn des Winters; während des Wanderns bringen sie die Geschlechtsprodukte zur Reife, nehmen aber keine Nahrung auf, sondern zehren von den während des Aufenthalts im Meere angesammelten Reservestoffen; das Laichen erfolgt an flachen Stellen kiesiger Bäche; in diesen wächst auch die Brut auf, um erst nach etwa 16 Monaten (als „Salmlinge") den Eltern ins Meer zu folgen. Acipenser sturio dringt im Rhein bis Speyer, A. ruthenus in der Donau bis Ulm vor. Petromyzon marinus wandert im Rhein bis Basel, in der Elbe bis nach Böhmen. Bei den Heringen und anderen Clupeiden, bei den Makrelen und Thunfischen u. a. macht der gleiche Trieb sich noch insofern bemerkbar, als sie zum Laichen aus tieferen

Digitized by Google

und landfernen Meeresbezirken in Schwärmen die flacheren und küstennahen, bisweilen selbst brackige Gewässer aufsuchen. Aehnliches gilt für gewisse lacustrische Salmoniden (Coregonus); bei gewissen Flußfischen führt der Wandertrieb nur noch zu einem Auf- und Absteigen, ohne daß das Meer erreicht wird (Petromyzon fluviatilis, Salmo fario). Entgegen den vorigen streben die Schellfische (Gadus aeglefinus) in der Nordsee zum Laichen den tieferen nördlichen Gebieten zu. Die Schollen (Pleuronectes platessa) suchen nach Beendigung des pelagischen Larvenlebens zuerst flache und küstennahe, in den folgenden Jahren immer tiefere Wasserbezirke auf (bis über 40 m), doch nähern sie sich im Winter stets der Küste; nach Heincke ist das Nahrungsbedürfnis Ursache dieser Ortsveränderungen, die Laichplätze liegen auf hoher See. Die Flundern (Pleuronectes flesus) verbringen einen Teil ihres Jugendlebens in den Flüssen, laichen aber im Meer. Die Aale (Anguilla) leben bis zum Eintritt der Fortpflanzungsfähigkeit (die ♂♂ 5 bis 6, die ♀♀ 7 bis 8 Jahre) in Binnengewässern. Danach wandern sie, eine silberhelle Tönung annehmend und wie die Lachse jede Nahrung verschmähend, stromab ins Meer, wo sie erst die volle Geschlechtsreife erlangen; hier findet in ca. 1000 m Tiefe (bei den nordeuropäischen Aalen also in beträchtlich küstenfernen Teilen des Atlantischen Ozeans) das Laichen statt (J. Schmidt); nur hier wurden bisher die jüngsten Leptocephali (s. o. S. 1093) erbeutet; diese wandern wiederum den Küsten bezw. Flüssen zu, die sie, je nach deren Entfernung von der Brutstätte, nach mehr oder minder langer Zeit und demzufolge mehr oder minder völlig metamorphosiert erreichen; in diesem Stadium sind sie als „Montée" bekannt. — Ein Teil der „bathypelagischen" Tiefseefische führt, anscheinend vorwiegend zur Nachtzeit, periodische Wanderungen in vertikaler Richtung aus.

ε) Landwanderungen. Ihrer Bedeutung nach nicht völlig verständlich sind bis jetzt die Landwanderungen tropischer Süßwasserfische. Einige (Clarias, Doras, Callichthys) sollen sie bei drohender Austrocknung ihrer Wohnorte unternehmen, um größere Wasseransammlungen aufzusuchen; andere (Anabas, Ophiocephalus) sollen nur nachts und nach starken Regenfällen über Land wandern. Einige Fische scheinen spontan, ohne gerade zu wandern, das Wasser zeitweilig zu verlassen (Loricaria); Periophthalmus jagt sogar Insekten auf dem feuchten Strande. Viele tropische Fische (Siluriden, Ophiocephalus u. a. m.) überstehen die Zeit der Dürre im Schlamm vergraben, die Dipnoer halten einen förmlichen „Sommerschlaf" in einem erhärteten Schlammgehäuse. — Für die meisten Fische mit respirierenden Schwimmblasen oder akzessorischen Atmungseinrichtungen (Labyrinthfische u. a., vgl. Fig. 51) wurde gezeigt, daß sie direkter Luftaufnahme durchaus bedürfen und rasch zugrunde gehen, sobald sie an dieser verhindert werden, selbst wenn ihnen gut durchlüftetes Wasser zur Kiemenatmung geboten wird. Dagegen sind sie in feuchter Luft, also unter Ausschaltung der Kiemenatmung, stunden-, ja tagelang zu leben befähigt.

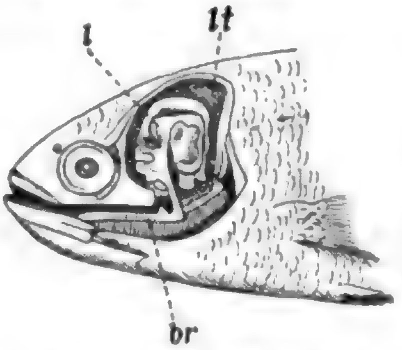


Fig. 51. Kopf des Kletterfisches (Anabas scandens). Mit geöffneter Labyrinthtasche (lt). l Labyrinthlamellen, br I. Kiemenbogen. Nach Henninger.

4b) Nahrung. Die Nahrung der Fische ist vorwiegend animalisch; auch bei solchen, die vegetabilische Stoffe oder „Schlamm" aufnehmen, sind die unter diesen enthaltenen Kleintiere für die Ernährung am wichtigsten. Reine Pflanzenfresser finden sich häufiger im Süßwasser (Ceratodus, ein Teil der Characiniden und Cypriniden), als im Meere (Box, Naseus u. a.). Einige Fische erbeuten über dem Wasser schwebende Insekten („Luftnahrung"): Forellen, Alburnus, Toxotes. Unter den übrigen nähren sich ein Teil von größeren Wassertieren, insbesondere wieder von Fischen, andere von hartschaligen Mollusken, Krustern, Korallen (Scariden, Plectognathen, unter den Selachiern Heterodontus und Myliobatis), sehr viele von schwebenden Kleintieren (Plancton), etliche sogar von kleinsten Lebewesen, wie Diatomeen usw. (Loricariiden). Vorwiegend räuberisch sind die Haie, doch gerade die größten unter ihnen (Selache maxima, Rhinodon) nähren sich von Kleintieren. Das Mittel zur Gewinnung dieser Kleintiernahrung bieten bei Knorpel- und Knochenfischen die auf dem Innenrand der Kiemenbögen stehenden Siebfortsätze; sie bilden ein jeweils gröberes oder feineres Sieb oder Kiemenfilter, in welchem das hindurchstreichende Atemwasser die größeren oder kleineren Nahrungsorganismen zurückläßt (vgl. Zander, Zeitschr. f. wiss. Zool. Vol. 84, 1906). Pristiophorus und Pristis be-

Digitized by Google

nutzen ihre mächtigen bezahnten Rostra wohl zum Aufwühlen des Grundes, um darin verborgene Kleintiere zu erbeuten; ähnlich wahrscheinlich Polyodon und Psephurus. Unter die Parasiten sind allenfalls nur Petromyzon und die Myxinoiden zu rechnen, die größere Fische anfressen bezw. sich in sie einbohren. Fierasfer, der den Enddarm der Holothurien bewohnt, nährt sich von den durch deren Exkremente angelockten Tieren. — Einige Fische (Nomeus), besonders Jugendstadien (Caranx), suchen, anscheinend zum Schutz, die Gesellschaft von Nesseltieren (Siphonophoren, Medusen) auf; Minous inermis lebt in „Symbiose“ mit einem auf seiner Haut proliferierenden Hydroidpolypen.

Unter den eigentümlichsten Ernährungsbedingungen leben die Tiefseefische; bei dem Mangel an pflanzlichem und tierischem Plancton sind sie, abgesehen von ihren Wohnortsgenossen, auf die herabsinkenden Leichen größerer Tiere angewiesen; sie sind häufig durch ganz unverhältnismäßige Größe des Rachens und des Magens ausgezeichnet (Fig. 52). Auf andere Eigentümlichkeiten der Tiefseefische wurde schon bei jeweiliger Gelegenheit hingewiesen (s. insbesondere Färbung, Augen, Leuchtorgane); hier sei noch an die gewöhnlich außerordentliche Zartheit ihres Skeletts und die Schwäche der Muskulatur erinnert.

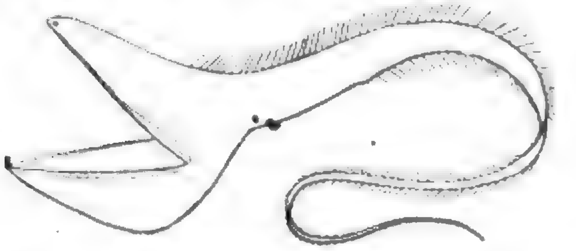


Fig. 52. Eurypharynx pelecanoides. Nach Goode und Bean.

4c) Fortpflanzung. Die Eier werden meist ins Wasser abgelegt und dort besamt; viele machen freischwebend (pelagisch) ihre Entwickelung durch, andere werden am Boden, an Wasserpflanzen u. dergl. befestigt (Cypriniden). Bei der Begattung der Selachier umschlingt das ♂ das ♀, das eine Pterygopodium wird in dessen Kloake eingeführt und dort durch seine gespreizten Endglieder fixiert. Bei Cyprinodonten (Glaridichthys) erfaßt das ♂ die Urogenitalpapille des ♀ mit dem klammerartigen Ende des Begattungsorgans (s. S. 1089) und über eine Rinne des letzteren wird eine Spermatophore in den Ovidukt befördert. Sekundäre Geschlechtsmerkmale (außer den schon erwähnten Brunstfärbungen, s. S. 1060) werden bei den Chimaeren von dem bestachelten Stirnfortsatz des ♂ (Fig. 8 st) repräsentiert; bei den Rochen finden sich Unterschiede in der Bestachelung beim ♂ und ♀; auch die Hautzähnchen der Loricariiden sollen beim ♂ stärker entwickelt sein. Bei den Cyprinodonten stehen die ♂♂ den ♀♀ beträchtlich in der Größe nach. Der Eierablage und Besamung gehen oft Werbespiele, auch Wettkämpfe der ♂♂ voraus (Betta pugnax). „Hochzeitskleider“ wurden schon erwähnt; selten treten Lautäußerungen auf („Trommelkonzerte“ südamerikanischer Welse, Sørensen).

4d) Brutpflege. Brutpflege wird am häufigsten geübt durch Nestbau; in einfachster Weise (Anlegung einer Grube) von den Salmoniden; kunstvoller, im einzelnen nach verschiedener Methode, meist unter Verwendung von Pflanzenteilen, von den Stichlingen, Antennarius, Callichthys, Chaetostomus, Heterotis, Gymnarchus, Dipnoern, Amia u. a. Die Gobiiden legen die Eier in eine Grube; die sie mit einer umgekehrten Muschelschale bedecken; der Seestichling verbindet Pflanzenteile vermittelst aus der Niere abgesonderter Schleimfäden; das Nest der Labyrinthfische besteht aus Luftblasen, die von einem erhärtenden Mundsekret umhüllt und verbunden werden. Das ♂ bewacht meist die Brut. Apogon, Osteogeniosus, Arius (♂), Tilapia (♀) u. a. Cichliden, tragen die Eier bis zum Ausschlüpfen der Jungen im Maul; die Amblyopsiden in den Kiemenhöhlen (womit bei den letzteren wahrscheinlich die Verlagerung des Genitalporus, dem auch der After gefolgt ist, weit nach vorn bis an die Kehle zusammenhängt; Eigenmann). Aspredo (♀) trägt die Eier am Bauche an vaskularisierten Stielen befestigt; ähnlich Solenostoma (♀), aber in einer von den Bauchflossen gebildeten Tasche; bei den Syngnathiden übernehmen die ♂♂ in ähnlicher Weise (mit Ausnahme von Nerophis, wo die Eier frei an der Bauchhaut haften, unter Bildung einer besonderen hinter dem After gelegenen Bruttasche) die Brutpflege. Das ♀ des Bitterlings (Rhodeus amarus) deponiert seine Eier vermittelst einer langen Legeröhre in den Kiemen von Flußmuscheln (Anodonta), über deren Mantel das ♂ das Sperma entleert. — Vivipar sind die Mehrzahl der Haie und zahlreiche Teleosteer (Zoarces, die Höhlenfische Stygicola und Lucifuga, viele Cyprinodonten, die Embiotociden, Sebastes, Comephorus — ein Tiefenfisch des Baikalsees —, die Süßwasserarten von Hemiramphus — unter diesen merkwürdigerweise wieder einige Höhlenformen).

4e) Körpergröße. Die Körpergröße schwankt in weiten Grenzen. Die Elasmobranchier sind durchschnittlich von be-

Digitized by Google

deutender Größe; Selache maxima (10 m), Rhinodon typicum (16 m), Rochen wie Dicerobatis giornae, stellen die größten bekannten Formen dar. Die Teleosteer sind durchschnittlich von geringer Größe; das Maximum erreichen sie mit Arapaima gigas (4,5 m), dem sich Formen wie der Thun (bis 3 m) und Orthagoriscus mola (2 m lang und ebenso hoch) anreihen. Andererseits repräsentiert ein Gobiide (Mistichthys luzonensis, 12 bis 14 mm lang) das kleinste erwachsene Wirbeltier. Auch die Teleosteerlarven sind bemerkenswert als kleinste freilebende Wirbeltiere. Die Ganoiden halten auch im Körperumfang wiederum etwa die Mitte zwischen den Selachiern und Teleosteern.

4f) Aehnliche bionomische Charaktere bei systematischer Verschiedenheit. Ein Phänomen, auf das hier kurz hingewiesen sei, ist die Ausbildung ähnlicher bionomischer Charaktere bei Vertretern weit getrennter systematischer Abteilungen. Einer der frappantesten Fälle ist die Habitusähnlichkeit gewisser Mormyriden und Gymnotiden, die neben anderem eine rüsselförmige Schnauze zur Entnahme ihrer Nahrungstiere aus schlammigem Boden übereinstimmend ausgebildet haben. Auf der Südhalbkugel sind die Forellen durch Galaxiiden, im indischen Hochgebirge durch Cypriniden (Schizothorax) vertreten, die sich ihnen auch im Aussehen mehr oder minder angleichen. Der „Aal"-Charakter wird, außer bei den Anguilliden und Muraeniden, in verschiedenen Gruppen erreicht, so bei Symbranchiden, Gymnotus, Mastacembelus, Muraenolepis, Calamoichthys u. a. Weiter kann hier diesen Erscheinungen nicht nachgegangen werden.

5. System. Verwandtschaftsbeziehungen. I. Unterklasse: Cyclostomata Duméril (Marsipobranchii Bonap.). Wurmförmige nackthäutige Fische ohne paarige Flossen, mit unvollkommenem, im Kiefer- und Kiemenapparat eigenartig umgebildeten Skelett, persistenter Chorda, unpaarer Nasenöffnung; mit einem Saugmund ohne eigentliche Kiefer, Kiemen in sackförmigen Räumen (7 und mehr Paare), Darm ohne Magen und Appendices, Genitalporen zur Entleerung der Geschlechtsprodukte.

1. Ordnung: Petromyzontes (Hyperoartii Bonap.). Nasengang innen geschlossen, Saugmund und Zunge mit Hornzähnen besetzt, 7 Kiemensäcke mit besonderem Wassergang verbunden, Darm mit schwacher Spiralfalte; Eier klein, Entwickelung mit Metamorphose.

Eine Familie: Petromyzontidae. Petromyzon marinus, Meerlamprete (Fig. 53), P. fluviatilis, Flußneunauge, P. branchialis (planeri), Bachneunauge, in Europa, Asien und Nordamerika. Mordacia und Geotria in Chile und Tasmanien.

2. Ordnung: Myxinoides (Hyperotreti Bonap.). Nasengang den Gaumen durchbohrend, Mund von 4 Bartfäden umstellt, ohne Lippen, kammförmige Zähne auf der Zunge, ein medianer Zahn am Gaumen; die Kiemensäcke münden einwärts direkt in den Darm, keine Spiralfalte; Eier groß, hornschalig; Bewohner der kalten Meere, in Seefischen schmarotzend.

Eine Familie: Myxinidae. Myxine glutinosa Inger, Schleimfisch, in nördlichen Meeren; Bdellostoma im südlichen Pazifik.

II. Unterklasse: Elasmobranchii Bonap. (Chondropterygii Cuv.). Fische von bedeutenderer Körpergröße, mit Hautzähnen (Placoidorganen) bedeckt oder nackt, mit unpaaren und paarigen Flossen; Knorpelskelett, dessen Wirbel die Chorda unter Durchbrechung der Scheiden verdrängen. Kiemen an durch Radien gestützten Septen, meist in vollständigen Taschen; keine Schwimmblase, Darm mit Spiralfalte; Conus arteriosus mit mehreren Klappenreihen; Eileiter ein Müllerscher Gang; beim ♂ eine Geschlechtsniere, stets ein Begattungsorgan; die großen Eier werden im Eileiter befruchtet; Enddarm, Harn- und Geschlechtswege münden in eine Cloake. Meeresfische.

Fig. 53. Petromyzon marinus. Nach Goode und Bean.

1. Ordnung: Plagiostomi Cuv. Schädel hyostyl oder amphistyl; querer Mundspalt, mit modifizierten Placoidzähnen bewehrt; 5 bis 7 direkt nach außen führende Kiemenspalten und meist Spritzlöcher; ausgeprägte Heterocerkie. — Die folgende Einteilung entspricht im wesentlichen der von Regan (Proc. Zool. Soc. London 1906) angegebenen.

1. Unterordnung: Selachioidei (Pleurotremata), Haie; Plagiostomen mit gestrecktem, walzenförmigem Körper, seitlichen Kiemenspalten vor den Brustflossen.

a) Notidanoidei; Haie mit mehr als 5 Kiemenspalten, einer D*) ohne Stachel, der A gegenüber (die Bildung von Wirbelkörpern ist mehr oder minder unterdrückt; sofern sie statthat, herrscht Diplospondylie).

*) Ueber die Bedeutung der Abkürzungen s. S. 1056.

1. Fam. Chlamydoselachidae. Nur eine lebende Art: Chlamydoselachus anguineus, ein aalförmiger, weit verbreiteter Tiefseehai, mit kurzem Rostrum, fast endständigem Mund, seitlichen Nasenöffnungen, sehr kleinem dorsalen Spritzloch; die äußeren Oeffnungen der 6 Kiemenspalten sind von den Hinterrändern der Septen überdeckt; das Palatoquadratum ist durch ein Ligament in der Orbita, hinten an einem großen „Hyomandibulare" (Epihyale?) befestigt, der Postorbitalfortsatz erreicht nicht den Schädel.

2. Fam. Notidanidae. Mund unterständig, Schädel amphistyl. Notidanus griseus (Hexanchus) mit 6, cinereus (Heptanchus) mit 7 Kiemenspalten, im Atlantik und Mittelmeer.

b) Galeoidei; Haie mit 5 Kiemenspalten, Cranium vorn in 3 Rostralknorpel endigend, Palatoquadratum nur am Hyomandibulare befestigt, die hinteren Kiemenspalten meist über der Basis der P, 2 D ohne Stacheln, A vorhanden.

3. Fam. Lamnidae. Nasenlöcher nicht mit dem Munde kommunizierend, Spritzlöcher klein oder fehlend. Große pelagische (zum Teil Tiefsee-) Haie. — Lamna cornubica, Heringshai, im Atlantik. Carcharodon rondeletii (bis 13 m lang), tropisch und subtropisch. Alopecias vulpes, Fuchshai (gegen 4 m), im Atlantik und Pazifik. Selache (Cetorhinus) maxima, Riesenhai (bis 10 m), im Nordatlantik und Südpazifik. Nahe verwandt ist Odontaspis.

4. Fam. Rhinodontidae. Rostralknorpel nicht konvergent; Mund und Nasenöffnungen am Vorderende der kurzen und breiten Schnauze, durch Rinnen verbunden, Gebiß kleinzähnig, Schwanz mit seitlichen Kielen, Grube vor der C. — Rhinodon typicum (bis 16 m lang), anscheinend in allen wärmeren Meeren. Gingylostoma.

5. Fam. Scylliidae. Zähne klein, in mehreren Reihen gleichzeitig funktionierend, rudimentäre Nickhaut vorhanden. Kleine Haie der Litoralregion, Schaltierfresser. — Scyllium (Katzenhaie), Chiloscyllium, Pristiurus u. a.

6. Fam. Carchariidae. Rostrum sehr lang, Mund halbmondförmig, keine Nasolabialrinnen, Spritzlöcher klein oder fehlend, Nickhaut wohl ausgebildet; mittelgroße Haie, vivipar. — Carcharias glaucus, Blauhai (4,5 m), in wärmeren Meeren; Galeus canis, Hundshai (1,5 m), weit verbreitet; Zygaena malleus, Hammerhai (bis 4 m), in warmen Meeren. Mustelus laevis, Glatthai, mehrere andere Arten im Atlantik, Mittelmeer usw.

c) Squaloidei; Haie mit solidem Rostrum, Palatoquadratum außer mit dem Hyomandibulare mit dem Cranium prä- oder postorbital mehr oder minder fest verbunden; meist 5 seitliche Kiemenspalten.

7. Fam. Heterodontidae. (Cestracionidae). 2 D mit Stacheln, A vorhanden, Rostrum kurz, Nasenöffnungen unterseits, im Gebiß konische bis flache Zähne, Palatoquadratum der Schädelbasis breit angelehnt (fossile Verwandte, wie Hybodus, sind echt amphistyl). — Heterodontus (Cestracion), mehrere Arten im Pazifik, Schaltierfresser.

8. Fam. Spinacidae. 2 D, meist mit Stacheln, A fehlt, Mundspalt wenig gekrümmt, daneben jederseits eine tiefe Grube, Palatoquadratum mit kräftigem Postorbitalfortsatz, aber ohne feste Verbindung mit dem Schädel. Kiemenspalten eng; Viviparität die Regel. — Centrina, im Mittelmeer und Atlantik; Acanthias, Dornhaie, in den gemäßigten südlichen und nördlichen Meeren. Spinax (Fig. 1b), mit ähnlicher Verbreitung. Centrophorus; Scymnus; Laemargus borealis, Grönlandhai.

9. Fam. Rhinidae. 2 D auf dem Schwanze, A fehlt, Körper abgeflacht, der Rochenform sich nähernd, P breit, ihre Basis bedeckt die Kiemenöffnungen; Mund- und Nasenöffnungen fast endständig, kein Rostrum; Palatoquadratum mit großem Postorbitalfortsatz, Gebiß mit kegelförmigen Zähnen. — Rhina squatina, Meerengel, vivipar, in tropischen und gemäßigten Meeren.

10. Fam. Pristiophoridae. 2 D vorhanden, A fehlt; Rostrum sehr lang, beide Ränder mit großen Hautzähnen besetzt, mit 2 Barteln unterseits. Palatoquadratum präorbital am Schädel befestigt. — Pristiophorus, mehrere Arten der „Sägehaie" in den australischen und japanischen Meeren. Pliotrema, mit 6 Kiemenspalten. NB. Die 3 zuletzt aufgeführten Familien gehören nahe zusammen und schließen sich im Wirbelbau, Mangel der A, u. a. den Rochen an; die Rhinidae werden von einigen Autoren überhaupt zu diesen gestellt; die Pristiophoriden teilen mit den Rochen u. a. das charakteristische Occipitalgelenk (vgl. hierüber, insbesondere die Beziehungen zu Pristis, L. Hoffmann, Zool. Jahrb., Abt. f. Anat., Vol. 33, 1912).

2. Unterordnung: Batoidei, Rochen. Plagiostomen mit breitem, flachem, vom schlankeren Schwanzteil meist scharf abgesetzten Vorderkörper, P mit diesem verwachsen, A fehlt, D, wenn vorhanden, auf dem Schwanze; Kiemenspalten ventral. — Stets sind große Spritzlöcher (dorsal hinter dem Auge, vgl. Fig. 1a) vorhanden, niemals Augenlider; das Palatoquadratum ist vom Schädel frei, das Hyomandibulare meist mächtig ausgebildet und vom Hyoidbogen unabhängig.

a) Rhinoraji (Jaekel); Rochen mit großem knorpeligem Rostrum; Beckengürtel mit paarigen Epipubisfortsätzen.

1. Fam. Pristidae. Körper gestreckt (haiähnlich), Schwanz nicht scharf abgesetzt, P frei, 2 D, Rostrum lang, abgeflacht, sägeartig mit großen seitlichen, in Alveolen des Rostralknorpels sitzenden Hautzähnen besetzt, ohne Barteln; Bezahnung schwach. — Pristis, Sägeroche, in warmen Meeren.

2. Fam. Rhinobatidae. Körper gestreckt (haiähnlich), Rostrum lang, vorn abgerundet, von den P nicht erreicht, 2 D, C gut entwickelt, seitliche Längsfalten am Schwanz. — Rhinobatus, Rhynchobatus u. a., in warmen Meeren.

b) Rochen ohne medianen Rostralknorpel, mit mächtigen Präorbitalknorpeln; Becken wie bei a: Narcobatoidei.

3. Fam. Torpedinidae. P mit dem Rumpf zu einer kreisrunden Scheibe verwachsen, Schwanz kurz, mit Seitenfalten, 2 D, C gut entwickelt, Haut nackt, zwischen der P und dem Schädel jederseits ein elektrisches Organ. — Torpedo, Zitterroche; T. ocellata und T. marmorata

Digitized by Google

im Mittelmeer, andere Gattungen tropisch und subtropisch.

c) Rochen ohne knorpeliges Rostrum, Beckengürtel mit medianem Fortsatz: Dasybatoidei.

4. Fam. Rajidae. P bilden mit dem Rumpf eine etwa rhombische Scheibe, V tief eingeschnitten, Schwanz lang, mit Seitenfalten, schwach elektrische Organe enthaltend; 2 sehr kleine D, C oft verkümmert, in der Haut Rauhigkeiten und größere Stacheln. Bewohner der nördlichen und südlichen gemäßigten Meere; europäisch u. a.: Raja batis, Glattroche, clavata, Keulenroche, radiata, Sternroche (Fig. 1a).

5. Fam. Trygonidae. Rumpf eine breite Scheibe, P vor dem Rostrum zusammenlaufend, Schwanz lang, ohne Seitenfalten, an Stelle der D oft gezähnte Stacheln. — Urogymnus, Trygon, Urolophus, Pteroplatea; T. pastinaca, Stechroche, sehr weit verbreitet, auch in der Nordsee.

6. Fam. Myliobatidae. Rumpf sehr breit, P flügelförmig, besondere Kopfanhänge von ihnen abgegliedert, 1 D, Gebiß mit Pflasterzähnen; vivipar; große, zum Teil riesige Rochen der wärmeren Meere. — Myliobatis aquila, Adlerroche; Aëtobatis; Rhinoptera; Ceratoptera und Dicerobatis („Teufelsrochen").

NB. Hasse (1879) legte der Einteilung der Plagiostomen die Wirbelstruktur (s. S. 1064) zugrunde; seine Cyclospondyli umfassen die Spinaciden, die Asterospondyli die übrigen Haie außer den Notidaniden, Rhiniden und Pristiophoriden; die beiden letzten nebst den Rochen sind Tectospondyli.

2. Ordnung: Holocephala. Schädel autostyl, Gaumen und Mandibel Zahnplatten tragend; nur 4 Kiemenspalten, von einem Kiemendeckel überdeckt, Septen reduziert; Achsenskelett mit persistierender Chorda, acentrisch; Hinterende diphycerk oder schwach heterocerk.

Eine Familie: Chimaeridae. Placoidschuppen reduziert, meist nur in der Jugend vorhanden, ♂ mit erektilem Stirnanhang; Fortpflanzung durch hornschalige Eier. — Chimaera (monstrosa, colliei, affinis) vorwiegend der gemäßigten nördlichen, Callorhynchus (antarcticus) der südlichen Zone angehörig, Harriotta im Pazifik.

III. Unterklasse: Ganoidei (Agassiz, J. Müller). Fische mit knorpelig-knöchernem Skelett, Hautskelett aus Cutisverknöcherungen, bisweilen unter Beteiligung von Placoidorganen, gebildet; Flossen vorwiegend durch Lepidotrichien gestützt; Kiemen halbfrei, Deckel mehr oder minder gut ausgebildet; Opercularkieme meist, oft auch ein Spritzloch vorhanden; Vorderdarm mit Schwimmblase oder Lungen, Mitteldarm mit Appendices und Spiralklappe. Herz mit Conus arteriosus, oft auch mit Arterienbulbus; meist besteht Urogenitalverbindung; keine innere Befruchtung. Wenige rezente Vertreter, fast ausschließlich im Süßwasser (NB. Die „Ganoiden" werden hier mit Günther (1886) im weiten Sinne, auch die Dipnoer begreifend, gefaßt; vgl. übrigens S. 1104).

a) Ganoiden mit unvollkommenem Kieferskelett (palatognathe).

1. Ordnung Dipnoi, Lurchfische. Mit rundlichen Schuppen bekleidete Ganoiden, mit knorpelig-knöchernem Skelett, uneingeschränkter Chorda, ohne Wirbelkörper, diphycerk; paarige Flossen, aus Haupt- und biserialen Nebenstrahlen bestehend; Ober- und Zwischenkiefer fehlen, Zahnplatten finden sich am Vomer, Pterygopalatinum und Spleniale; kein Rostrum, Nasenöffnungen innerhalb des Mundrandes; Lungen vorhanden, das Atrium unvollkommen geteilt.

α) Dipneumones: Fam. Lepidosirenidae, mit paarigen Lungen; Nebenstrahlen der Flossen wenig entwickelt, Larven (Fig. 49) mit äußeren Kiemen und brustständigen Haftorganen. — Lepidosiren paradoxa, Schuppenmolch, im Gebiet des Amazonenstroms; Protopterus annectens, mit 3 Paar äußeren Kiemen, afrikanisch.

β) Monopneumones: Fam. Ceratodidae, mit unpaarer Lunge, Flossen breit, ruderförmig, Larven ohne äußere Kiemen und Haftorgane. Ceratodus forsteri, in Queensland (Mary- und Burnett-River).

b) Ganoiden mit vollkommenem Kieferskelett (teleostome).

2. Ordnung Chondrostei, Knorpelganoiden. Mit unvollkommen verknöchertem Skelett, großem knorpeligem Rostrum, knöchernen Maxillaria, uneingeschränkter Chorda, ausgeprägter Heterocerkie; Fulcra vor den unpaaren Flossen; Nasenöffnungen auf der Oberseite der Schnauze, Schwimmblase vorhanden, meist auch Spritzlöcher; Larven mit präoralem Haftorgan.

Fam. Acipenseridae; Körper mit 5 Reihen von Knochenschildern gepanzert, Mund vorstreckbar, zahnlos, 4 Barteln unterseits am Rostrum, 4 Kiemen und Operkularkieme. — Acipenser sturio, Stör, in Westeuropa und Ostamerika, A. ruthenus, Sterlet, A. huso, Hausen, im Stromgebiet des Schwarzen Meeres, A. sinensis usw. Scaphirhynchus, ohne Spritzloch, 4 Arten in Zentralasien und im Mississippi.

Fam. Polyodontidae; Haut nackt oder mit kleinen Knochensternen versehn; Mundspalt transversal, kleine Zähne enthaltend, von mächtigem Rostrum überragt; 4½ Kiemen, keine operkulare. — Polyodon folium, Löffelstör, mit flachem Rostrum, im Mississippi; Psephurus gladius, mit kegelförmigem Rostrum, in China.

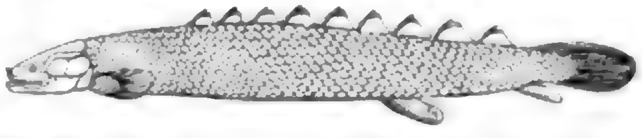


Fig. 54. Polypterus arnaudii. Nach Duméril.

3. Ordnung Crossopterygii Huxley (Polypteroidei Gthr.). Mit Rhombenschuppen, stark verknöchertem Skelett, knöcherner Wirbelsäule; ohne Branchio-

Digitized by Google

stegalstrahlen; Spritzlöcher vorhanden, sowie paarige Lungen; After nahe dem Schwanzende; Larven mit einem Paar äußerer Kiemen (Fig. 48).

Einzige recente Familie: Polypteridae; D in zahlreiche, an Stachelstrahlen befestigte Flößchen aufgelöst, keine Fulcra. — Polypterus, mehrere Arten im Nil und in westafrikanischen Flüssen (Fig. 54); Calamoichthys, aalförmig, ohne V, Altcalabar.

4. Ordnung Holostei (Lepidosteidei Gthr.). Mit sehr vollständig verknöchertem Skelett, ohne Spritzloch, mit zelliger Schwimmblase; Larven mit präoralem Haftorgan.

Fam. Lepidosteidae. Schuppen rhombisch, mit schmelzartiger Außenschicht, Flossen mit Fulcra, 4 Kiemen und Operkularkieme, Schnauze langgestreckt, stark bezahnt. — Lepidosteus, Knochenhecht, mehrere Arten (L. osseus usw.) in Nord- und Mittelamerika und Cuba.

Fam. Amiidae. Schuppen zykloid, keine Fulcra, 4 Kiemen, keine Operkularkieme, Schwimmblase vorn in 2 Hörner geteilt. — Amia calva, Schlammfisch, in Nordamerika.

IV. Unterklassse: Teleostei (J. Müller). Fische mit vorwiegend knöchernem Skelett, dessen Wirbel außerhalb der Chordascheiden entstehen; homocerk oder gephyrocerk; Haut in der Regel beschuppt, selten nackt, Flossen durch Lepidotrichien gestützt; Kiemen frei, stets ein Kiemendeckel, meist eine Schwimmblase; Darm ohne Spiralfalte, meist mit Pförtneranhängen; Conus arteriosus zugunsten des Aortenbulbus zurückgebildet; Gonaden frei oder sackförmig, keine Urogenitalverbindung; die Eier werden gewöhnlich nach der Ablage besamt.

Die Knochenfische wurden von Artedi nach der Flossenbeschaffenheit in Acanthopterygier und Malacopterygier, von Linné nach der Flossenstellung in Apodes, Abdominales, Jugulares und Thoracici eingeteilt (einige aber den „Amphibia nantes" überwiesen); Cuvier benutzte beiderlei Merkmale (Acanthoptérygiens — Malacoptérygiens abdominaux, subbrachiens, apodes), stellte aber die Plectognathen und Lophobranchier ganz abseits; Agassiz rechnet diese beiden Gruppen (sowie die Welse) den Ganoiden zu. Joh. Müller läßt sie an ihrem isolierten Platz; die übrigen Teleosteer scheidet er in Acanthopterygier, Anacanthinen (die Gadoiden, Ophidiiden und Pleuronectiden umfassend), die Pharyngognathen (mit verwachsenen unteren Schlundknochen) und Physostomen. Günther schließt sich seinem System nahe an, trennt aber die physostomen Scombresociden von den übrigen Pharyngognathen (den physoclisten und stachelflossigen Labriden und Chromiden). Die nachfolgend gegebene Gruppierung ist die von Boulenger (1904) vorgeschlagene.

1. Ordnung Malacopterygii. Schwimmblase vorhanden, mit offenem Luftgang; Kiemendeckel gut ausgebildet, Schultergürtel mit Mesocoracoid, am Schädel befestigt, Flossen stachellos, die Bauchflossen abdominal. Vordere Wirbel getrennt; Schwimmblase mit dem Labyrinth in Verbindung, aber ohne Webersche Knöchelchen.

Fam. Mormyridae. Schnauze verlängert, oft rüsselartig mit kleiner Mundöffnung, Opercularknochen unter der Haut verborgen, enge Kiemenspalten; am Schwanze jederseits ein schwachelektrisches Organ. In Binnengewässern Afrikas. — Mormyrus, Hyperopisus, Gymnarchus.

Fam. Albulidae; Albula (Butirinus) ist bemerkenswert durch einen Conus arteriosus mit 2 Klappenreihen. — Hierher auch die Hyodontidae und Notopteridae, nordamerikanische bezw. afrikanisch-indische Süßwasserfische.

Fam. Osteoglossidae. Körper mit großen gefelderten Schuppen bedeckt, Kopf nackt; Kiemenspalten weit, keine Pseudobranchie; Süßwasserfische. — Arapaima gigas, in Brasilien; Osteoglossum, je 1 Art in Südamerika, Borneo und Queensland; Heterotis mit suprabranchialem Luftatmungsorgan (Kiemenschnecke), im Nil und westafrikanischen Flüssen.

Fam. Clupeidae. Körper beschuppt, Kopf nackt; Kiemenspalten sehr weit, Pseudobranchie meist vorhanden, Opercularstücke vollzählig; keine Fettflosse; meist Meeresfische. — Engraulis encrasicholus, Anchovis; Clupea harengus, Hering, Cl. sprattus, Sprotte, Cl. alosa, Maifisch, Cl. finta, Finte, Cl. pilchardus, Pilchard, Sardine usw.; Chatoëssus; Meletta; Elops; Lutodeira usw. — Der naheverwandte Chirocentrus dorab ist durch eine spiralige Faltenbildung der Darmschleimhaut ausgezeichnet.

Fam. Salmonidae. Körper beschuppt, Kopf nackt, Kiemendeckel vollständig, Pseudobranchie vorhanden; hinter der D eine Fettflosse; Gonaden frei, als Gonodukte funktionieren Peritonealtrichter (Fig. 39). Vorwiegend im Süßwasser. — Salmo salar, Lachs, S. fario, Bachforelle (Fig. 1c), S. lacustris, Seeforelle, S. trutta, Meerforelle, S. salvelinus, Saibling, S. hucho, Huchen, Donaulachs; Osmerus eperlanus, Stint; Coregonus albula, kleine Maräne, C. wartmanni, Blaufelchen, C. lavaretus, große Maräne, C. hiemalis, Kilch, C. oxyrhynchus, Schnäpel; Thymallus vulgaris, Aesche; Mallotus u. a.

Die Alepocephalidae (Alepocephalus, Bathytroctes) und Stomiatidae (Stomias, Chauliodus, Astronesthes, Argyropelecus) sind Tiefseeformen.

2. Ordnung: Ostariophysi. Schwimmblase in der Regel mit offenem Luftgang. Schultergürtel am Schädel befestigt, mit Mesocoracoid; stachelartige Strahlen der Rücken- und Bauchflossen durch Verschmelzung der Segmente von Gliederstrahlen gebildet; die vordersten 4 Wirbel stark modifiziert, oft miteinander verschmolzen, die Kette der Weberschen Knöchelchen tragend, durch welche die Schwimmblase mit dem Ohr kommuniziert. Fast durchweg Süßwasserbewohner.

Fam. Characinidae. Körper beschuppt, Mund bezahnt, nicht vorstreckbar, ohne Barteln.

Digitized by Google

Ueberaus artenreiche Familie mit teils carnivoren, teils herbivoren Vertretern im tropischen Afrika und Amerika. — Wichtigste Genera: Macrodon, Erythrinus, Curimatus, Citharinus, Leporinus, Nannocharax, Alestes, Tetragonopterus, Hydrocyon, Sarcodaces, Xenocharax, Serrasalmo.

Fam. Gymnotidae. Mund bezahnt, meist von Ober- und Zwischenkiefern begrenzt, nicht vorstreckbar; Körper der Aalform sich nähernd, V fehlen, D und C rudimentär, A sehr lang, da der After kehlständig. In Binnengewässern des tropischen Amerika. — Gymnotus (Electrophorus) electricus, Zitteraal mit starken elektrischen Organen; Sternarchus u. a. mit mehr oder minder verlängerter Schnauze, ähnlich den (afrikanischen) Mormyren.

Fam. Cyprinidae. Mund zahnlos, oben meist nur von den Zwischenkiefern begrenzt, vorstreckbar, untere Schlundknochen groß, ein- oder mehrreihig mit Zähnen besetzt, keine Fettflosse, Darm ohne Appendices, Schwimmblase meist groß, in 2 bis 3 Abteilungen zerlegt, Ovarien geschlossen. In Binnengewässern der warmen und gemäßigten Zonen, in Afrika spärlich, in Südamerika und Australien fehlend. — a) Catostominae (Catostomus, Sclerognathus). b) Cyprininae, zahlreiche Gattungen, einheimisch: Cyprinus carpio, Karpfen, Carassius vulgaris, Karausche (Abart: auratus, Goldfisch), Barbus barbus, Barbe, Gobio, Leuciscus „Weißfische", Idus melanotus, Alant (Abart: Goldorfe), Scardinius erythrophthalmus, Rotfeder, Squalius cephalus, Döbel, S. leuciscus, Hasel, Telestes agassizi, Strömer, Phoxinus laevis, Elritze, Tinca vulgaris, Schleie, Chondrostoma nasus, Nase, Rhodeus amarus, Bitterling, Abramis brama, Blei, A. vimba u. a., Aspius rapax Rapfen, Alburnus lucidus, Ukelei, Leucaspius u. a. m. c) Cobitidinae, Schwimmblase reduziert, in Knochenkapseln eingeschlossen: Misgurnus fossilis, Schlammbeißer, Nemachilus barbatula, Schmerle, Cobitis taenia, Steinbeißer. d) Homalopterinae, mit rudimentärer Schwimmblase, südasiatische Gebirgsfische, meist mit Haftorganen: Homaloptera, Gastromyzon. — (Zur Einteilung der Cyprinoiden vgl. Regan, Ann. Mag. Nat. Hist. (8), Vol. 8, 1911.)

Fam. Siluridae. Haut nackt oder mit großen Knochentafeln bedeckt, Mund nicht vorstülpbar, von Bartfäden umgeben („Nematognathi"), von den bezahnten Unter- und Zwischenkiefern begrenzt, Maxillaria rudimentär, kein Suboperculum, nur ein Pterygoid; bisweilen eine Fettflosse, Darm ohne Appendices. Zahlreiche Gattungen, vorwiegend in Binnengewässern warmer Länder. a) Clariinae, mit baumförmigen Kiemenanhängen: Clarias, Heterobranchus. b) Silurinae: Silurus glanis, Wels, in Mitteleuropa und Westasien; Saccobranchus, mit suprabranchialem Luftsack; Schilbe, Eutropius, Wallago, Neosilurus u. a. c) Bagrinae: Bagrus, Amiurus („Zwergwelse", nordamerikanisch), Arius. d) Doradinae: Doras, Synodontis. e) Malopterurinae: Malopterurus electricus, Zitterwels, im Nil. f) Callichthyinae: Callichthys, südamerikanisch. — (Zur Einteilung der Siluroiden vgl. Eigenmann, Calif. Acad. Sc., 1890, und Regan, Ann. Mag. Nat. Hist. (8). Vol. 8, 1911.)

Fam. Loricariidae. Welsartige, mit zahntragenden Knochenschildern gepanzerte Fische mit unterständigem, von breiten Lippen umgebenem Maul; ohne Parapophysen, mit festsitzenden Rippen; Schwimmblase auf kleine paarige, in Knochenkapseln eingeschlossene Säckchen beschränkt. — Loricaria cataphracta, Harnischwels, Chaetostomus, Plecostomus, Otocinclus, Arges usw., sämtlich in Südamerika. Ebendort die ihnen verwandten, aber den Siluriden näherstehenden Aspredidae (Aspredo).

3. Ordnung Symbranchii. Aalförmig, ohne paarige Flossen, mit getrennten vorderen Wirbeln, ohne Webersche Knöchelchen, mit nur einer medioventralen äußeren Kiemenöffnung, ohne Schwimmblase.

Die Symbranchidae, mit normalen Kiemen und am Schädel befestigtem Schultergürtel, umfassen 3 teils indische, teils amerikanische Arten. Die Amphipnoidae haben verkümmerte Kiemen, akzessorische Luftatmungsorgane, einen freien Schultergürtel. Amphipnous und Monopterus, indische Süßwasserfische.

4. Ordnung Apodes. Meist eine Schwimmblase mit offenem Luftgang vorhanden; Zwischenkiefer fehlen; wenn Maxillaria vorhanden, sind sie median durch das mit dem Vomer verschmolzene Ethmoid getrennt. Schultergürtel frei, ohne Mesocoracoid; Flossen ohne Stacheln, V fehlen; keine Weberschen Knöchelchen, vordere Wirbel getrennt. In Meeren und Binnengewässern aller Zonen.

am. Muraenidae; ohne Zunge und Oberkiefer, innere Kiemenöffnungen eng, Meeresbewohner. — Muraena, über 80 Arten (M. helena im Mittelmeer).

Fam. Anguillidae; mit Zunge und Oberkiefern, innere Kiemenöffnungen weit. — Anguilla vulgaris, Flußaal; Conger, Meeraale; viele in der Tiefsee: Nemichthys, Saccopharynx, Eurypharynx (Fig. 52), Cyema usw.

5. Ordnung Haplomi. Schwimmblase mit (meist) offenem Luftgang, Kiemendeckel vollständig, Schultergürtel am Schädel befestigt, ohne Mesocoracoid; Flossen gewöhnlich ohne, selten mit einigen Stacheln, V abdominal, bisweilen fehlend; keine Weberschen Knöchelchen.

Fam. Esocidae. Körper beschuppt, ohne Fettflosse, D auf dem Schwanzabschnitt; Darm ohne Appendices, Pseudobranchie vorhanden. Esox lucius, Hecht, in Nordeuropa und -amerika.

Fam. Galaxiidae. Körper nackt, keine Fettflosse, D gegenüber der A, keine Pseudobranchie, Appendices vorhanden; die Eier fallen in die Bauchhöhle, wie bei den Salmoniden, denen die G. auch im Habitus und Laichgewohnheiten gleichen und die sie in der südlichen gemäßigten Zone vertreten. — Galaxias, Neochanna.

Fam. Scopelidae. Nackt oder beschuppt, mit Fettflosse; pelagisch und abyssal. — Scopelus, Saurus, Paralepis usw.

Fam. Cyprinodontidae, Zahnkarpfen. Kopf und Körper beschuppt; Mund ohne Barteln, wie bei den Karpfen vorstreckbar, nur von den

Digitized by Google

bezahnten Zwischen- und Unterkiefern begrenzt; keine Fettflosse. Der Schwimmblasengang bildet sich meist frühzeitig zurück. Bewohner der Binnengewässer (auch salziger) der wärmeren Zonen, durchweg von geringer Größe, einige vivipar. — Fundulus; Orestias; Cyprinodon; Anableps tetrophthalmus, Vierauge, in Mündungsgebieten südamerikanischer Flüsse; Poecilia; Mollienesia; Glaridichthys usw.

Den Amblyopsidae gehören Amblyopsis spelaeus (Kentucky) und andere blinde Höhlenfische an. — Die Stephanoberycidae, Tiefseefische ohne Stacheln in D und A, sind in mancher Hinsicht den Beryciden ähnlich; Stephanoberyx, Malacosarcus.

6. Ordnung Heteromi. Schwimmblase ohne offenen Gang; Kiemendeckel vollständig, Parietalia die Frontalia vom Supraoccipitale trennend; Schultergürtel ohne Mesocoracoid, am Supraoccipitale oder Epioticum aufgehängt, Posttemporale klein oder durch ein Ligament ersetzt, V abdominal oder fehlend.

Die Gruppe umfaßt 2 auf die Tiefsee beschränkte Familien „von dunklen Verwandtschaftsbeziehungen" (Boulenger), Halosauridae und Notacanthidae, und die Fierasferidae, nackthäutige pigmentarme Fische, ohne V, mit kehlständigem After, pseudoparasitisch in Holothurien lebend.

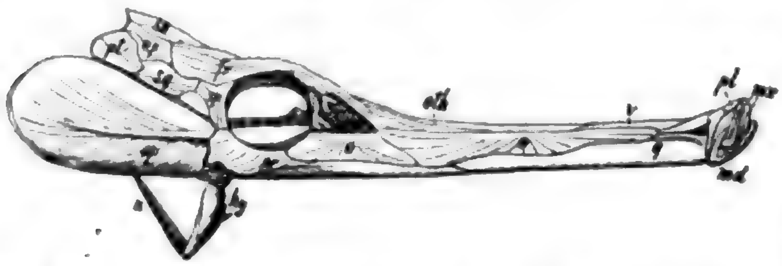


Fig. 55. Schädel von Syngnathus acus; so Supraoccipitale, fr Frontale, eth Mesethmoid, ep, sq, sp Epi-, Pter- und Sphenoticum, pt Posttemporale, o Operculare (an dessen hinterem Rand das Suboperculum hervorsieht), pr Praeoperculum, q Quadratum, m Mandibel, mx Zwischen- und Oberkiefer, pl Palatinum, v Vomer, o Praeorbitalia, hy Hyoid, u Urohyale.

7. Ordnung Catosteomi. Schwimmblase ohne Luftgang (selten ganz fehlend), Parietalia, wenn vorhanden, durch das Supraoccipitale getrennt; Schultergürtel am Schädel befestigt, mit meist sehr großem Coracoid, ohne Mesocoracoid, V, wenn vorhanden, abdominal oder die Beckenknochen am Schultergürtel befestigt.

a) Selenichthyes. — Fam. Lamprididae mit nur einer Art: Lampris luna, pelagisch, weit verbreitet; ihre Stellung ist unsicher, Regan (Proc. Zool. Soc. London 1907) bildet aus L., den Veliferidae, Trachypteridae und Lophotidae (vgl. S. 1103) die Unterordnung „Allotriognathi".

b) Hemibranchii. — Fam. Gastrosteidae. Mund endständig, bezahnt, Schnauze kurz, kegelförmig, Schuppen an den Körperseiten schilderartig, vor der D isolierte Stacheln. — Gasterosteus aculeatus, gemeiner Stichling, G. pungitius Zwergstichling. G. spinachia Meerstichling. Die Aulostomidae (Aulostoma, Fistularia) und Centriscidae (Centriscus, Amphisile) sind durch die Röhrenform der Schnauze, Zahnlosigkeit, Modifikation der 4 bis 6 ersten Wirbel und eigenartige Integumentverhältnisse ausgezeichnet.

c) Lophobranchii, „Büschelkiemer" (Cuvier). Das Kiemenskelett ist schwach ausgebildet, die Bogenstücke unvollzählig. — Fam. Syngnathidae. Schnauze lang, röhrenförmig, hauptsächlich durch die verlängerten Symplectica, Quadrata, Praeopercularia, dorsal vom Mesethmoid. gebildet, seitlich von großen Orbitalknochen bedeckt (Fig. 55); Mund zahnlos, Haut mit Knochenschildern gepanzert, Kiemenblättchen wenig zahlreich, groß, mit schmaler Basis, V fehlen, Wirbel ohne Gelenkfortsätze, die drei ersten nahtartig verbunden. — Syngnathus, Siphonostoma, Seenadeln; Nerophis, Schlangennadel und Hippocampus, Seepferdchen, ohne C, mit Greifschwanz. — Die Solenostomidae, die in wenigen Arten den indischen Ocean bewohnen, mit V, 2 D, nähern sich mehr den Centriscidae. — Hierher gehören wohl auch die Pegasidae (Pegasus draco), die andererseits zu den Scleroparei Beziehungen zeigen.

NB. Jungersen stellt auch Gasterosteus zu den Scleroparei und faßt mit Regan die übrigen unter b genannten Familien und die Lophobranchier als Solenichthyes zusammen.

8. Ordnung Percesoces. Schwimmblase, wenn vorhanden, ohne Luftgang; Parietalia durch das Supraoccipitale getrennt; Schultergürtel am Schädel aufgehängt, ohne Mesocoracoid; V, wenn vorhanden, abdominal, jedenfalls die Beckenknochen mit dem Schultergürtel nicht fest verbunden.

Fam. Scombresocidae. Oberer Mundrand von Zwischen- und Oberkiefern begrenzt, untere Schlundknochen vereinigt, Flossen ohne Stacheln. Die meisten im Meere, einige im Süßwasser, diese vivipar, mit Kopulationsorgan. — Belone acus, Hornhecht; Hemirhamphus; Scombresox saurus, Makrelenhecht; Exocoetus, „fliegende Fische".

Fam. Mugilidae. 2 D., die vordere stachelig, Bezahnung rudimentär, statt der Seitenlinie Kanälchen auf allen Schuppen. — Mugil capito, Meeräsche u. a.

Die Ammodytidae (Sandaale), Atherinidae Sphyraenidae (Pfeilhechte), Stromateidae u.a. enthalten wenig nahe untereinander verwandte Meeresfische. — Die Ophiocephalidae sind tropische Süßwasserfische mit stachellosen unpaaren Flossen, ausgezeichnet durch ein pharyngeales Luftatmungsorgan; Ophiocephalus, Schlangenköpfe. Hierher stellt Boulenger auch die barschähnlichen, mit echten Labyrinthorganen ausgestatteten Anabantidae; Anabas

Digitized by Google

scandens, Kletterfisch, in Süßwässern Ostindiens (vgl. Fig. 51).

9. Ordnung Anacanthini. Schwimmblase ohne Luftgang, Parietalia durch das Supraoccipitale, Prooticum und Exoccipitale durch das vergrößerte Opisthoticum geschieden. Schultergürtel am Schädel aufgehängt, ohne Mesocoracoid; V unter oder vor den P, Beckenknochen hinter der Schultergürtelsymphyse, nur lose durch Ligament mit ihr verbunden. Flossen stachellos, C ohne ausgedehntes Hypurale, symmetrisch. Fast nur marin.

Fam. Macruridae, Tiefseefische ohne eigentliche C, mit unterständigem Mund. — Macrurus, Bathygadus, Lyconus.

Fam. Gadidae; Mund endständig, vorstreckbar, Körper mit Cycloidschuppen bedeckt, 2 bis 3 D, weite Kiemenöffnungen; meist in kalten Meeren und der Tiefsee. — Gadus morrhua, Dorsch, Kabeljau, G. aeglefinus, Schellfisch, G. merlangus, Wittling, G. virens, Köhler u. a.; Merluccius vulgaris, Hechtdorsch; Motella, Seequappen; Lota vulgaris, Quappe, im Süßwasser. Die Muraenolepidae konvergieren im Bau der P (10 Radialia) und in der Beschuppung gegen die Anguillidae.

10. Ordnung Acanthopterygii. Schwimmblase meist ohne offenen Gang, Kiemendeckel vollständig, Supraoccipitale berührt die Frontalia; Schultergürtel am Schädel aufgehängt, ohne Mesocoracoid, V brust- oder kehlständig; mehr oder minder fest mit dem Schultergürtel verbunden; Kiemenöffnung meist groß, vor der Basis der P. Stacheln sind nicht ausnahmslos vorhanden. — Formenreichste Abteilung, in mehrere Untergruppen gesondert (deren kurze Charakteristik hier die der sehr zahlreichen Familien vertreten mag).

a) Perciformes. Stachlige D ausgebildet, V brustständig, Körper seitlich mehr oder minder zusammengedrückt. Bei den Berycidae u. a. kommt noch ein offener Luftgang vor. — Percidae (Perca fluviatilis, Flußbarsch, Acerina cernua, Kaulbarsch, Lucioperca sandra, Zander usw.); Toxotidae; Serranidae (Serranus, Sägebarsche, Polyprion, Riesenbarsche, Lates, Apogon [Fig. 1d], Chilodipterus); Cepolidae; Sciaenidae (Sciaena aquila, Adlerfisch, Umbrina cirrhosa, Umberfisch, Pogonias chromis Trommelfisch, Corvina nigra, Rabenfisch); Pristipomatidae (Pristipoma, Dentex usw.); Sparidae (Cantharus, Sargus, Gaißbrassen, Pagellus, Seebrassen, Chrysophrys, Goldbrassen); Pomacentridae, Chaetodontidae [Squamipinnes, Schuppenflosser] (Chaetodon, Chelmo usw.); Scorpididae (Psettus, Fig. 1e); Caproidae; Osphromenidae (bilden mit Anabas die „Labyrinthici“ Cuviers: Osphromenus, Trichogaster, Macropodus u. a. m.); Embiotocidae; Cichlidae [Chromides]; Acanthuridae; Mullidae (Mullus barbatus, M. surmuletus, Meerbarben); Labridae Lippfische (Labrus, Crenilabrus, Epibulus, Coris usw.); Scaridae, Papageifische.

b) Scombriformes. Stachelige D, wenn gesondert, mit kurzen schwachen Stacheln, V brustständig, C wenn gut ausgebildet tief gegabelt. — Carangidae (Caranx, Stöcker, Naucrates ductor, Lotsenfisch); Scombridae (Scomber, Makrele, Thynnus, Thun); Trichiuridae (Trichiurus); Xiphiidae (Xiphias gladius, Schwertfisch), Coryphaenidae (Coryphaena Goldmakrele).

c) Zeorhombi. Sehr stark seitlich komprimiert, meist unsymmetrisch. Zeidae (Zeus faber, Petersfisch); Pleuronectidae, Plattfische, mit unsymmetrischem Kopf, beide Augen auf einer Seite, Mund protractil, keine Schwimmblase (Hippoglossus vulgaris, Heilbutt; Rhombus maximus, Steinbutt, laevis, Glattbutt; Pleuronectes platessa, Goldbutt, flesus, Flunder, limanda, Kliesche, cynoglossus, Hundszunge; Solea vulgaris, Seezunge usw.).

d) Kurtiformes: nur eine sehr aberrante Art, Kurtus indicus.

e) Gobiiformes. Stachelige D, wenn vorhanden, mit wenigen biegsamen Stacheln, V brustständig, auch fehlend; Präoperculum ohne Knochenstütze; After auf stark vorragender Papille. Gobiidae (Gobius niger, minutus u. a., Meergrundeln). Periophthalmus, Boleophthalmus.

f) Discocephali. Die stachelige D zu einer über dem Schädel und dem Vorderrücken liegenden Haftscheibe umgebildet. — Echeneidae (Echeneis, Schiffshalter).

g) Scleroparei. Präoperculum mit dem vergrößerten 2. Suborbitalknochen verbunden, V brustständig. — Scorpaenidae (Scorpaena porcus, Meereber, Sebastes); Cottidae (Cottus gobio im Süßwasser, C. scorpius, bubalis, quadricornis, Seeskorpione); Cyclopteridae (Cyclopterus lumpus, Seehase); Agonidae (Agonus, Peristhetion), Triglidae (Trigla, Seeschwalbe, Knurrhahn, Schwimmblase mit offenem Luftgang!); Dactylopteridae (Dactylopterus, Flughahn); Comephoridae.

h) Jugulares. Präoperculum ohne Stütze, Kiemenöffnung vor der fast senkrechten Basis der P, V kehlständig. — Trachinidae (Trachinus); Uranoscopidae (Uranoscopus), Gobiesocidae (Gobiesox, Lepadogaster), Blenniidae, Schleimfische (Blennius, Centronotus, Anarrhichas), Zoarcidae (Zoarces viviparus, Aalmutter; Lucifuga und Stygicola in Höhlengewässern Kubas).

i) Taeniosomi. Bandförmig, mit brustständigen V, vorderste Strahlen der sehr langen D oft verlängert, A kurz oder fehlend, Basis der P wagerecht; Hoch- oder Tiefseefische. — Trachypteridae (Trachypterus, Regalecus); Lophotidae (vgl. S. 1102).

11. Ordnung Opisthomi. Kein offener Schwimmblasengang, Kiemendeckel vollständig, unter der Haut verborgen, das Supraoccipitale berührt die Frontalia, die Parietalia scheidend; Schultergürtel an der Wirbelsäule aufgehängt, weit hinter dem Schädel, ohne Mesocoracoid, unpaare Flossen mit Stacheln, V fehlen.

Fam. Mastacembelidae; aalförmige Süßwasserfische, meist der indischen Region angehörig, einige in Syrien und Westafrika (Mastacembelus, Rhynchobdella).

Digitized by Google

12. Ordnung **Pediculati**, Armflosser. Kein offener Schwimmblasengang, Operculum groß, unter der Haut verborgen, das Supraoccipitale berührt die Frontalia, die Parietalia trennend; Schultergürtel am Schädel aufgehängt, ohne Mesocoracoid; keine Rippen, V kehlständig; Kiemenöffnungen enge Schlitze mehr oder minder hinter der Basis der P; Körper nackt oder mit Stacheln und knöchernen Tuberkeln bedeckt.

Fam. Lophiidae; Kopf groß, breit, Mund sehr weit, stark bezahnt; Haut nackt, stachelige D vorhanden. — Lophius piscatorius, Seeteufel. Die Ceratiidae (Ceratias, Melanocetus), Malthidae, Gigantactidae sind meist Tiefseebewohner; von den Antennariidae lebt Antennarius pelagisch zwischen schwimmender Vegetation (Sargassomeer).

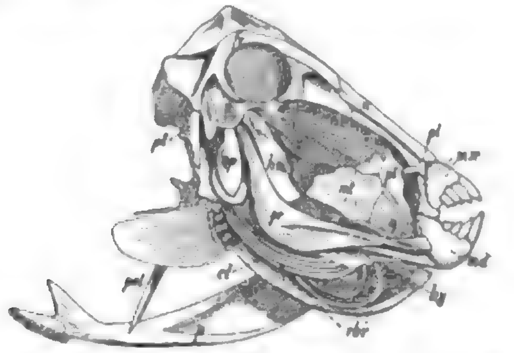


Fig. 56. Schädel und Extremitätengürtel von Balistes. hm Hyomandibulare, mt Metapterygoid, pt Ektopterygoid, n Nasale, hy Hyoid, r br Kiemenhautstrahlen, cl Cleithrum, p cl Postcleithrale, p Beckenknochen (an dessen hinterem Ende ein bezahnter Stachel das Rudiment der Ventralis repräsentiert); die übrigen Bezeichnungen wie in Figur 55. Nach Hollard.

13. Ordnung **Plectognathi**. Schwimmblase ohne Luftgang, die Kiemenöffnungen sehr eng, die Kiemendeckelknochen mehr oder minder verkümmert; das Supraoccipitale berührt die Frontalia, trennt die Parietalia; Ober- und Zwischenkiefer oft fest verbunden (Fig. 56 mx); Schultergürtel am Schädel befestigt, keine Rippen. V bruständig, oft verkümmert, Beckenknochen, wenn vorhanden, mehr oder weniger coossifiziert; Körper mit rhombischen Schuppen, Knochenschildern oder -dornen bedeckt, oder nackt. — Sämtlich den wärmeren Meeren angehörend.

a) Sclerodermi, mit deutlich gesonderten Kieferzähnen, mit Resten der stacheligen D und der V. (Fig. 56). — Triacanthidae (Triacanthus), Balistidae (Balistes, Drückerfisch), Ostraciontidae, Kofferfische, mit festgefügtem Knochenpanzer.

b) Gymnodontes, Zwischen- und Oberkiefer fest verwachsen, Zähne zu einem schnabelartigen Gebilde verschmolzen, stachelige D und V fehlen. — Tetrodontidae (Tetrodon), Diodontidae (Diodon Igelfisch), Molidae (Orthagoriscus mola, Sonnenfisch; Tiefenform von bisweilen mächtigen Dimensionen).

Die Verwandtschaftsbeziehungen der Fische bringt das System in der gegenwärtigen Form nur undeutlich zum Ausdruck, insofern als es eine größere Zahl koordinierter Abteilungen verschiedener Stufe aufstellt, ohne deren dynamische Bedeutung hervorzuheben. In letzterer Hinsicht scheinen der Charakter des Teleosteers und des Chondropterygiers beherrschend, während die je nur wenige recente Vertreter einschließenden Gruppen der „Ganoiden“ Vermischungen teils jener beiden, teils des Fisch- und Amphibientypus aufweisen. Im ganzen verhalten sich die Chondropterygier, insbesondere die Haie, der allgemeinen Wirbeltierorganisation mehr konform als die Teleosteer; man ist daher geneigt, sie sowohl der Wurzel des Fischstammes als am nächsten stehend zu betrachten, als auch von ihnen ähnlichen Stammformen einesteils die Teleosteer durch Vermittelung der Knorpel- und Knochenganoiden, anderenteils durch Vermittelung von dipnoerartigen Formen die Amphibien genealogisch abzuleiten; die mannigfachen diesem Versuch entgegenstehenden Schwierigkeiten geben zu vielen Meinungsverschiedenheiten der Autoren im einzelnen Anlaß.

Innerhalb der Elasmobranchier bezeichnen Hai und Roche wieder eine polare Differenzierung, doch bestehen zwischen beiden vermittelnde Formen (Rhina, Pristiophorus Pristis, Rhinobatis); darüber, wie weit deren Mischcharaktere jeweils verwandtschaftliche Zugehörigkeit zu einer der beiden Gruppen, wie weit sie „Konvergenz“ ausdrücken, besteht keine Einigkeit; allgemein aber ist angenommen, daß die Rochen von haiartigen Vorfahren abzuleiten sind. Die Holocephalen gehören den generellsten Merkmalen nach zu den Elasmobranchiern, in manchen Zügen (Bezahnung, Lippenknorpel, Kiefergelenk, Urogenitalsystem) nähern sie sich den Cestraciontiden (Dean); andererseits weisen sie viele Affinitäten mit den Dipnoern auf (Autostylie, Bau des Achsen- und des Flossenskeletts, Bezahnung, Kiemenapparat u. a. m.); Huxley (1876) erachtete sogar ihre Differenz von den Plagiostomen für größer als die zwischen Teleosteern und Ganoiden.

Der Terminus „Ganoiden“ ist oben beibehalten worden als Sammelbegriff, nicht (mit Kner) im Sinne einer natürlichen Einheit; von den dort zusammengefaßten Formen tendieren die Dipnoer mehr gegen den Charakter der Elasmobranchier, die Chondrosteer, Crossopterygier und Holosteer

Digitized by Google

in verschiedenem Maße gegen den der Teleosteer (am meisten Amia; indessen bestehen zwischen Teleosteern und Ganoiden mehrere Berührungen, so daß mindestens wohl an eine „polyphyletische" Abstammung jener von diesen zu denken wäre). Kner und Bleeker glaubten unter den Ganoiden die „Protypen sämtlicher Hauptgruppen und großen Familien" der Teleosteer zu erkennen. Andererseits finden sich unter den Ganoiden Annäherungen an den Amphibientypus, so bei den Crossopterygiern und den Dipnoern, welche letzteren auf Grund vieler wichtiger Charaktere (Lungen, Außenkiemen, unvollkommene Kreislaufscheidung, Autostylie usw.) sicherlich als „die den Amphibien verwandtschaftlich weitaus am nächsten stehende Gruppe" bezeichnet zu werden verdienen (Semon, Zool. Anz. Bd. 24 1901). Doch fehlt es unter den Teleosteern (Panzerwelse) nicht ganz an gelegentlichen Berührungspunkten mit Amphibien.

Auch in der Gesamtheit der Knochenfische macht sich eine polare Gegensätzlichkeit bemerkbar, die im System durch eine Zweiteilung (Physostomen — Physoclisten u. ä.) zum Ausdruck zu bringen öfters versucht worden ist; niedrigere Körperform, abdominale Stellung der Bauchflossen, Mangel echter Stacheln und offener Schwimmblasengang scheinen die eine, hohe Körperform, stachelige Flossen, Verlagerung der Bauchflossen nach vorn, blindgeschlossene Schwimmblase die andere Hauptgestaltungsrichtung zu bezeichnen. Doch entspricht allen diesen Merkmalen je nur eine geringere Zahl von Familien, andere weisen eine Vermischung derselben auf (z. B. die als Percesoces und Anacanthini vereinigten), etliche nehmen eine sehr aberrante Stellung ein (Plectognathen). Wenn man daher auch hier zur Aufstellung einer größeren Zahl koordinierter Unterordnungen geschritten ist, so können diese doch nur zum kleinen Teil als natürliche Einheiten betrachtet werden, so etwa die Malacopterygier, Ostariophysen, Apodes, Acanthopterygier, Pediculaten, Plectognathen; andere umschließen nur wenige, sonst nirgends enger anzuschließende Formen (Symbranchii, Opisthomi, Heteromi) oder sie sind Sammelgruppen von untereinander wenig nahe verbundenen Formen, deren Affinitäten in verschiedene Richtungen weisen. So zeigen unter den Haplomi die Galaxiiden mannigfache Berührungspunkte mit den Salmoniden, die Cyprinodonten mit Malacopterygiern und Scombresociden, die Stephanoberyciden mit den Beryciden; Anabas unter den Percesoces steht den barschartigen Osphromeniden ganz nahe; die Batrachidae vermitteln zwischen Acanthopterygiern und Pediculaten, die Acanthuridae neigen den Plectognathen zu. Solche Beziehungen über Kreuz bilden für die Aufstellung eines allgemein verbindlichen Teleosteersystems eine gewisse Schwierigkeit. — Als die den Knorpelfischen bezw. Ganoiden am nächsten stehenden Teleosteer sind ohne Zweifel die Malacopterygier und Ostariophysen anzusehen, die daher im historischen Sinne auch wohl als die ältesten oder konservativsten bezeichnet werden; von letzteren sind die Siluriden geradezu als Zwischenformen von Teleosteern und Ganoiden (Coccosteus, Cephalaspis) in Anspruch genommen worden (Huxley); die eigenartigen Integumentverhältnisse, das stete Fehlen eines knöchernen Symplecticums, die Unvollständigkeit des Opercularapparates, die feste Verbindung des Posttemporale mit den Schädelknochen, das Vorhandensein des eigentümlichen Rostralknochens u. a. m. rechtfertigen es mindestens, den Welsen (inklusive Loricariiden) einen sehr selbständigen Platz anzuweisen. Die Hauptmasse der Teleosteer bildet nach der phylogenetischen Auffassung einen vom Stamm der höheren Vertebraten sich weit abwendenden und in eigenartigen Spezialisierungen blind endenden Ast.

Die Cyclostomen weisen durch den Mangel paariger Flossen, die große Zahl von Kiementaschen, Verkümmerung der höheren Sinnesorgane, den Zustand der Schilddrüse bei Ammocoetes, Unpaarigkeit des Geruchsorgans u. a. (vgl. S. 1072, 1075, 1080, 1081, 1088), zu den Leptocardiern hinüber (mit denen sie Owen als „Dermatopteri", Haeckel als „Monorhina" vereinigt). Andererseits erinnert die Mundbildung der Petromyzonten an die der Froschlarven (Huxley, Journ. Anat. Phys. Vol. 10, 1876); Goette (Entwickelung des Flußneunauges 1890) glaubte Rudimente von Lungen nachweisen zu können und empfahl, die Neunaugen mit den Amphibien „auch im System näher zusammenzustellen". Unzweifelhaft sind die Cyclostomen nicht Repräsentanten einer „primitiven" kieferlosen Stufe der Wirbeltierorganisation, sondern degenerierte bezw. larvoide Nachkommen gnathostomer Ichthyopsiden (Dohrn).

6. Die geographische Verbreitung der Fische steht in Abhängigkeit vom Klima (Temperatur) und faciellen Verhältnissen. Da die Süßwasserfische den klimatischen Einflüssen am meisten ausgesetzt und zugleich durch Landmassen und Meere in der Ausbreitung gehemmt sind, so lassen sie sich am ehesten gutbegrenzten tiergeographischen Regionen zuordnen: Günther unterscheidet deren 7, die sich auf 3 Hauptklimazonen verteilen:

a) Nördliche Zone, gekennzeichnet durch Chondrostei, zahlreiche Cypriniden,

Digitized by Google

Salmoniden, Esociden, spärliche Siluriden. Die (1.) paläarktische (europäisch-asiatische) und die (2.) nordamerikanische Region haben unterscheidende Charakterzüge im Vorkommen von Holostei hier, ihrem Fehlen dort, Vorkommen von Barben und Cobitiden dort, ihrem Fehlen hier.

b) Aequatorialzone, gekennzeichnet durch Reichtum an Siluriden; die (3.) indische und die (4.) afrikanische Region haben Reichtum an Cypriniden und Labyrinthfischen gemein; ersterer fehlen Dipnoer und Ganoiden; Ophiocephaliden, Mastacembeliden und Cobitiden sind dort zahlreich; in Afrika fehlen dieselben oder sind spärlich, dagegen finden sich hier Dipnoer (Protopterus), Polypteriden, Mormyriden. Der Cypriniden und Labyrinthici entbehren die (5.) tropisch-amerikanische und die (6.) tropisch-pazifische Region; Charakterformen der ersteren, die in dieser fehlen, sind die Chromiden, Characiniden, Gymnotiden, Loricariiden; in beiden Dipnoer (Lepidosiren bezw. Ceratodus).

c) Südliche Zone; Haplochitoniden und Galaxiiden vertreten zumeist die Salmoniden und Esoces; Siluriden treten zurück, Cypriniden fehlen. Die (7.) antarktische Region zerfällt in 3 ichthyologisch wenig verschiedene Subregionen: die tasmanische, neuseeländische und patagonische.

Nächstdem erweisen sich die Meeresfische des Litorals durch Klimazonen im Verein mit Landmassen und tiefen Meeresräumen am strengsten an Regionen gebunden. So ergeben sich mehr oder minder selbständige Litoralfaunen: 1. die des arktischen Ozeans; 2. die des gemäßigten nordatlantischen Ozeans (gegliedert in das westeuropäische, das nordamerikanische und das mediterrane Gebiet); 3. die des gemäßigten Stillen Ozeans (gegliedert in das Gebiet von Kamtschatka, das kalifornische und das japanische); 4. die der tropisch atlantischen Küste Amerikas; 5. die des indopazifischen Ozeans; 6. die der tropisch pazifischen Küste Amerikas; 7. die südafrikanische, australische und südamerikanische der gemäßigten Zone; 8. die des antarktischen Ozeans. Die Litoralfaunen gleichartiger Klimazonen lassen eine bedeutende Aehnlichkeit ihrer Zusammensetzung erkennen (z. B. die der gegenüberliegenden atlantischen Küsten von Europa und Nordamerika); besonders auffallend ist die Aehnlichkeit bei den verschiedenen Ozeanen zugekehrten Küsten desselben Kontinents, für deren Bewohnerschaft die Möglichkeit eines Austausches jedenfalls seit sehr langen Zeiträumen nicht mehr besteht; so an der pazifischen und atlantischen Küste Amerikas; die japanische und die Mittelmeerfauna haben nicht nur sehr viele identische Gattungen, sondern selbst Arten, welche zudem an den amerikanischen Küsten der gleichen Zone durchaus fehlen (Günther, vgl. a. D. S. Jordan, Science Vol. 14, 1901).

Die Fischfauna der Hoch- und Tiefsee läßt, angesichts der ihr gebotenen sehr gleichförmigen Bedingungen und des Mangels an topographischen Ausbreitungshindernissen, keine strengeren regionalen Begrenzungen erkennen. Die pelagischen und abyssalen Fische sind vielfach Kosmopoliten; viele Formen, welche die Tiefen der warmen und gemäßigten Meere bewohnen, erscheinen in den kalten Zonen oberflächlich. Nach Brauer haben indessen von der Tiefseegattung Macrurus nur wenige Arten wirklich kosmopolitische Verbreitung, die weitaus meisten bewohnen ein beschränktes Gebiet; das gleiche gilt für Vertreter mehrerer anderer Tiefseegattungen; es läßt sich annehmen, daß die Einwanderung derselben vom Litoral aus erfolgt ist, nachdem hier schon eine Aufspaltung in zahlreiche Arten erfolgt war und daß das Wohngebiet dieser also noch in Abhängigkeit von ihren Entstehungsgebieten steht. An der Zusammensetzung der Tiefseefauna beteiligen sich die Myxinoiden, die Elasmobranchier (relativ spärlich) und die Teleosteer (Muraenidae, Halosauridae, Alepocephalidae, Salmonidae, Stomiatidae, Scopelidae, zahlreiche Anacanthinen u. a. m.).

Wenn die Verschiedenheit der Fischfaunen durch langwährende Isolierung infolge klimatischer und facieller Verhältnisse hinreichend verständlich wird, so setzen andererseits einzelne Aehnlichkeiten in der Bewohnerschaft weit entlegener Gebiete, für welche ein Formenaustausch seit ungeheuren Zeiträumen ausgeschlossen erscheint, in Erstaunen. So kommt von den Dipnoern Ceratodus in Queensland vor, Protopterus im tropischen Afrika, der nahe verwandte Lepidosiren im Gebiet des Amazonenstroms. Sehr ähnlich sind die Osteoglossiden zerstreut (die aber auch im ostindischen Archipel einen Vertreter haben). Ebenso auffällig ist das Vorkommen von Polyodon im Mississippi, des verwandten Psephurus im Yang-ste-kiang; ähnlich verteilen sich die Scaphirhynchus-Arten. Umbra krameri kommt in Ungarn, die einzige andere Art (limi) in den Vereinigten Staaten vor. Agonus tritt in der nördlichen gemäßigten Zone bis zum Eismeer und an der chilenischen Küste auf. Retropinna auf Neu-Seeland ist der einzige Salmonide der südlichen Halbkugel. Auch einzelne Arten haben derart sporadische Verbreitung (Lates calcarifer in Indien und in Queensland; Rhodeus amarus in Europa und im Amur-Fluß, nicht in Sibirien). Da es sich meist um Süßwasserformen handelt, ist

Digitized by Google

die Erklärung dieser Verbreitungsverhältnisse durch Wanderung oder Verschleppung recht schwierig. Sie scheinen vielmehr auf ursprünglich ungeheuer weite zusammenhängende Wohngebiete der betreffenden systematischen Einheiten hinzuweisen.

Andererseits finden sich gelegentlich scharfe Grenzen der faunistischen Verteilung, wo in der Gegenwart ein fortlaufender Uebergang durch die örtlichen Bedingungen viel weniger behindert scheint. So ist das Fehlen der Cypriniden im tropischen Amerika und der pazifischen Region angesichts ihrer reichen Entfaltung in Nordamerika und Indien merkwürdig; zwischen der „cyprinoiden" indischen und der „acyprinoiden" tropisch-pazifischen Region verläuft die Grenze („Wallacesche Linie") von den Philippinen zwischen den großen Sundainseln hindurch, Celebes und Lombock der letzteren zuteilend. Für andere Fische, wie die Siluriden, hat diese Grenze aber keine Bedeutung. Auf die geologischen Vorgänge, die man zur Erklärung dieses Verhaltens herangezogen hat, kann hier nicht eingegangen werden. — Hier sei ferner darauf hingewiesen, daß selbst in kleineren zusammenhängenden Meeresräumen (wie Ost- und Nordsee) sich zahlreiche Rassen ausbilden, die ziemlich streng an der Oertlichkeit haften (so bei der Scholle, dem Hering, den Gadiden); selbst die Wanderfische scheinen ihr Ursprungsgebiet immer wieder aufzusuchen.

Die Fischfaunen ozeanischer Inseln erweisen sich denen der nächstbenachbarten Festländer im allgemeinen ähnlich, d. h. sie weisen meist generisch, wenn auch nicht spezifisch identische Formen auf. Und zwar sind dies meist solche, die Brack- bezw. Salzwasser nicht scheuen und deren Wandern über mäßige Meeresstrecken daher nicht unwahrscheinlich ist. Sehr landferne, kleinere und geologisch junge Inseln entbehren der Süßwasserfische.

Literatur. **L. Agassiz**, *Recherches sur les poissons fossiles, Neuchâtel 1833 à 1844.* — **L. Agassiz und C. Vogt**, *Anatomie des Salmones. Mém. Soc. Sc. Neuchâtel 1845.* — **G. A. Boulenger**, *Systematic account of Teleostei. Cambridge Nat. Hist. 1904.* — **A. Brauer**, *Die Tiefseefische. Ergebnisse der Deutschen Tiefseeexpedition, Vol.* **15**, *1906 bis 1908.* — **T. W. Bridge**, *Fishes. Cambridge Nat. Hist. 1904.* — **Cuvier und Valenciennes**, *Histoire naturelle des Poissons, 22 Vols. Paris 1828 à 1848.* — **B. Dean**, *Fishes living and fossil. New York 1895.* — **Derselbe**, *Chimaeroid Fishes. Carnegie Institution. Washington 1906.* — **C. Emery**, *Fierasfer. Fauna und Flora des Golfs von Neapel, II, 1880.* — **S. Garman**, *Chlamydoselachus anguineus. Bull. Mus. Comp. Zool. Harv., Vol.* **12**, *1886.* — **E. Gaupp**, *Das Hyobranchialskelett der Wirbeltiere. Anat. Hefte, Vol.* **14**, *1905.* — **C. Gegenbaur**, *Das Kopfskelett der Selachier, 1872.* — **T. N. Gill**, *Families and Subfamilies of Fishes. Mem. Nat. Acad. Sc. Washington, Vol.* **6**, *1893.* — **Goode und Bean**, *Oceanic Ichthyology. Washington 1895.* — **E. S. Goodrich**, *Cyclostomes and Fishes. London 1909.* — **A. Günther**, *Catalogue of the Fishes in the British Museum. London 1870.* — **Derselbe**, *Handbuch der Ichthyologie (deutsch von Hayek), 1886.* — **C. Hasse**, *Das natürliche System der Elasmobranchier, 2 Bde. Jena 1879 bis 1882.* — **T. H. Huxley**, *On Ceratodus Forsteri with observations on the classification of Fishes. Proc. Zool. Soc. London 1876.* — **Jordan und Evermann**, *The Fishes of North and Middle America. Bull. United States Mus., Vol.* **47**, *1896 bis 1898.* — **R. Kner**, *Ueber den Flossenbau der Fische, Sitzungsber. k. Akad. d. Wiss. Wien, math.-naturw. Kl., Vol.* **42**, *1861.* — **Derselbe**, *Betrachtungen über die Ganoiden als natürliche Ordnung, ibidem, Vol.* **54**, *1866.* — **E. Lönnberg und G. Favaro**, *Fische, in Bronns Klassen und Ordnungen des Tierreichs, 1901 (noch unvollendet).* — **E. Moreau**, *Histoire naturelle des Poissons de la France, 3 Vols et Suppl., 1881 à 1891.* — **J. Müller**, *Monographie der Myxinoiden. Abhandl. d. Berliner Akad. d. Wiss., 1833 bis 1843.* — **Derselbe**, *Bau und Grenzen der Ganoiden, ibidem, 1846.* — **J. Müller und J. Henle**, *Systematische Beschreibung der Plagiostomen, 1841.* — **R. Wiedersheim**, *Das Skelett und Nervensystem von Lepidosiren annectens. Jena 1880.* — **Derselbe**, *Das Gliedmaßenskelett der Wirbeltiere. Jena 1892.*

M. Rauther.

Fische.

Paläontologie.

1. Einleitung. 2. Die Unterklassen und Ordnungen der Fische. A. Cyclostomi. B. †Placodermi. C. †Arthrodira. D. Elasmobranchii. E. Dipnoi. F. Teleostomi. 3. Geschichte, geologische Verbreitung und Bedeutung der Fischstämme.

1. Einleitung. Nach Fossilfunden sind die Fische die frühest auftretenden Repräsentanten des Wirbeltierstammes. Bis in den tiefst untersilurischen oder jungkambrischen Glaukonitsand (Tremadoc) der russischen Ostseeprovinzen werden die Fische zurückverfolgt: V. Rohon deutete winzige Kegelzähnchen aus Dentin mit dünner Schmelzkappe (†[1]Palaeodus) als älteste Fischreste, deren genauere Stellung nicht zu eruieren ist. Ein anderes Vorkommen von Fischresten, in einem roten Sandstein aus der Umgebung von Canyon City, Colorado, wurde von C. D. Walcott ebenfalls als untersilurischen

[1]) Ein † vor einem Gruppen-, Gattungs- oder Artnamen bedeutet: nur fossil bekannt.

Digitized by Google

Alters angesprochen, während Zittel und andere für devonisches Alter plädierten.

Reichlicheres Auftreten von Fischresten (Flossenstacheln von Elasmobranchiern, Platten von Panzerfischen) ist erst aus jüngeren Obersilurablagerungen bekannt, und zwar besonders aus den oberen Oeselschen Schichten Rußlands, aus dem Ludlow und Downton von England und Schottland, wie aus äquivalenten Ablagerungen des östlichen Nordamerika. Seit dem Devon sind dann Fische aus marinen sowohl wie brackischen und limnischen Ablagerungen aller Formationen und zwar in erheblicher Anzahl bekannt.

Der Erhaltungszustand von fossilen Fischen ist ungemein verschieden. Naturgemäß hängt er von der Organisation der Fische ab: wir finden darum von Elasmobranchiern höchst selten mehr als Zähne oder Flossenstacheln, von Ganoiden und Knochenfischen häufiger größere Skelettreste, mehr oder weniger vollständige Schuppenpanzer. Auch das Sediment ist mit von ausschlaggebender Bedeutung für die Erhaltung der Fischreste: ganze Individuen, größere Körperteile konnten nur dort fossilisiert werden, wo feinkörniges Sediment die Fischleichen schnell bedeckte, sie vor Zerstörung durch andere Organismen oder durch stärkere Wasserbewegung, oder vor völliger Verwesung schützte. Die dolomitischen feinkörnigen Mergel im Obersilur von Oesel, manche schieferigtonigen Lagen der Oldred-Fazies, besonders von Kanada, die bituminösen Kupferschiefer des Perm Deutschlands, die bituminösen Posidonomyenschiefer im oberen Lias von Württemberg, die feinkörnigen lithographischen Schiefer des obersten Jura Süddeutschlands, Mergel der oberen Kreide des Libanon, Englands und von Kansas, feinkörnigste Sandsteine der west-

Fig. 1. †Seminotus capensis A. Sm. Woodw. Gruppe von lebend (oder als Leichen?) auf einen Sandstrand geworfenen Fischen, die schnell von neuen Sandlagen überdeckt worden sind. Trias, Karrooformation der Kapkolonie. Aus Abel.

Digitized by Google

fälischen Kreide, die kalkigen Mergel des Mt. Bolca im Eozän Oberitaliens, zahlreiche tertiäre Tone Mitteleuropas sind durch häufig ausgezeichnet erhaltene Fischreste berühmt geworden. In gröberen sandigen Gesteinen sind größere Reste von Fischkörpern seltener erhalten: im Oldred Schottlands, in manchen Sandsteinen der südafrikanischen Karrooformation (Fig. 1), in Triassandsteinen Mitteldeutschlands und Nordamerikas.

A. Unterklasse **Cyclostomi** (Marsipobranchii): vgl. zoologischen Teil S. 1097.

Nur zweimal sind fossile Fischtypen bekannt geworden, welchen manche Aehnlichkeit mit den lebenden Cyclostomen nicht abgesprochen werden kann.

Im untersten Oldred (Devon) von Caithness, Schottland, wurden in größerer Zahl kleine, etwa 5 cm lange Skelettchen gefunden: †Palaeospondylus Gunni Traq. (Fig. 2). Die von H. Traquair und W. J. and J. B.

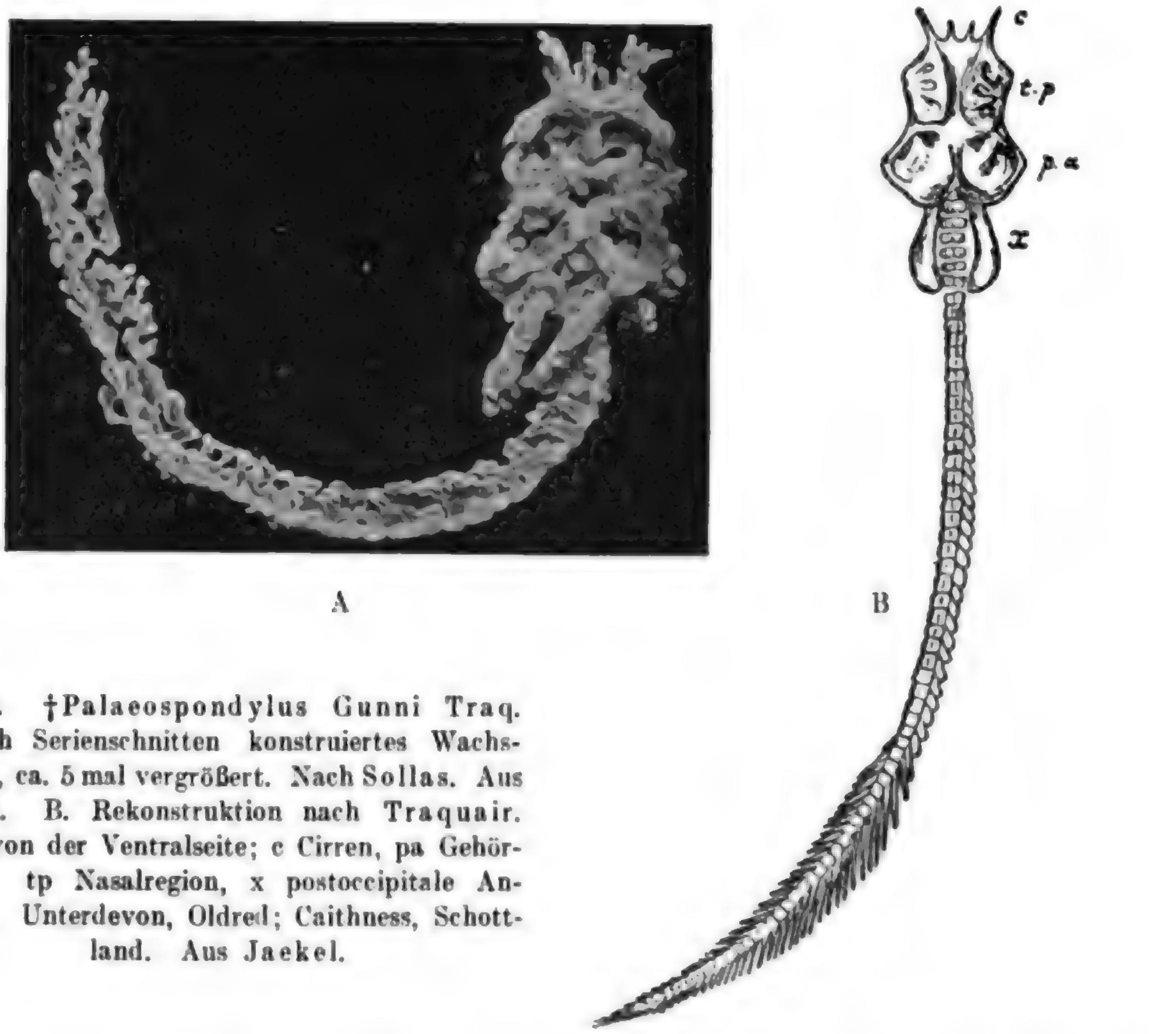


Fig. 2. †Palaeospondylus Gunni Traq. A nach Serienschnitten konstruiertes Wachsmodell, ca. 5 mal vergrößert. Nach Sollas. Aus Zittel. B. Rekonstruktion nach Traquair. Kopf von der Ventralseite; c Cirren, pa Gehörkapsel, tp Nasalregion, x postoccipitale Anhänge. Unterdevon, Oldred; Caithness, Schottland. Aus Jaekel.

Das fossile Material besonders paläozoischer, zum Teil auch noch mesozoischer Ablagerungen hat uns eine Fülle von Fischtypen geliefert, welche den heute lebenden fremdartig gegenüberstehen, zum Teil so fremd, daß eine bestimmte Einreihung in das System der lebenden Fische unmöglich ist.

2. **Die Unterklassen und Ordnungen der Fische.** Nach Ausscheidung des Leptocardiertypus Amphioxus werden die Fische hier — soweit sie unter Berücksichtigung der fossilen Formen mit der im zoologischen Teil gebrauchten Systematik in Einklang zu bringen sind — in 6 Unterklassen aufgeteilt: Cyclostomi, †Placodermi, † Arthrodira, Elasmobranchii, Dipnoi, Teleostomi.

J. Sollas genauer untersuchten Reste sind zum Teil in kohliger Substanz, zum Teil verkalkt erhalten. Am Vorderende des Kopfes, der länger als breit ist, steht ein (den Mund? umgebender) Kranz von kurzen Cirren; hinter einer breiten Orbitalregion(?) machen sich große Gehörkapseln bemerkbar. Andeutungen von Hyomandibular- und Mandibularbildungen, von 4 (?) Kiemenbogen werden angenommen. Am Hinterende der Kopfregion ragen 2 längliche Anhänge („Postoccipitalplatten", ? Brustflossen) nach hinten vor. In der Wirbelsäule werden ringförmige Zentra erkannt; sie tragen obere Bögen mit niedrigen Dornfortsätzen, in der Schwanzregion auch

Digitized by Google

untere Bögen. Die Schwanzflosse ist lang, diphyzerk-oxyzerk, mit niedrigen Flossenträgern. Von Rippen, Schuppen, paarigen Flossen ist nichts sicheres bekannt.

Aus sehr viel späterer Zeit, aus der jüngst-oberkarbonischen Gaskohle von Nyrschan in Böhmen, nennt Jaekel den zweiten, cyclostomen-ähnlichen Typus fossiler Fische: †Hypospondylus bohemicus. Vorn am Kopf des ca. 8 cm langen Körpers stehen cirrenartige Fortsätze; Jaekel will die 3 Schädelregionen und Mundbögen sowie 4 (?) Kiemenbögen unterscheiden können; von den Wirbeln sind nach ihm paarige Hypozentra und paarige obere Bögen prismatisch verkalkt erhalten. Auch hier ist die allein vorhandene oder erhaltene Schwanzflosse diphyzerk-oxyzerk.

Weder †Palaeospondylus noch †Hypospondylus lassen sich ungezwungen in bestimmte genetische Beziehungen zu den heute lebenden Cyclostomen bringen. In bezug auf die Ausbildung der Schädelregion und namentlich der Wirbelsäule erscheinen sie wesentlich höher differenziert. Wenn die Skelettbildungen der Cyclostomen in der Tat auf regressiven Anpassungs-Umformungsvorgängen beruhen (wie das z. B. Dollo und Jaekel aussprechen), so würden †Palaeospondylus und †Hypospondylus weniger weit vorgeschrittene Stadien solcher Umformungswege darstellen.

B. Unterklasse †**Placodermi** (†Ostracodermi).

Ordnungen: 1. †Anaspida, 2. †Heterostraci, 3. †Osteostraci, 4. †Antiarchi (Obersilur, Devon).

Als †Placodermen oder Panzerfische (mit Ausschluß der devonischen †Arthrodira) wird mit L. Agassiz eine Menge sehr verschiedenartig gebauter, recht absonderlich gestalteter Fische zusammengefaßt, die teils aus marinen Gesteinen des Obersilur und Devon, häufiger aber aus limnischen Ablagerungen des Devon (Oldred) Europas, in geringerer Zahl auch aus Nordamerika bekannt geworden sind. Gemeinsam ist allen diesen Formen das Fehlen paariger Flossen; der Lokomotion diente ganz allein die heterozerke, sonst recht verschieden gestaltete Schwanzflosse. Allen Placodermen fehlen Verfestigungen der wohl weich, knorpelig gewesenen Wirbelsäule und der Extremitätengürtel.[1]) Ebenso fehlen Zähne und verfestigte Kieferbildungen, besonders des Mandibularbogens; die Placodermen werden darum auch öfters als †Agnatha den übrigen Fischen gegenübergestellt (nur bei den †Antiarchi kommen ventrale, den queren Mundspalt hinten begleitende Platten vor, die als dermale Belegplatten einer Mandibel gedeutet werden könnten). Der Mangel eines festeren, inneren Stützskeletts wird wett gemacht durch die Ausbildung recht sehr verschiedenartiger äußerer Schutzskelette: ein dermaler Schuppenpanzer, dessen Elemente sehr verschiedenartigen histologischen Bau aufweisen, kann in der Vorderregion des Körpers zu einer größeren oder geringeren Zahl von oft sehr festen Panzerplatten werden, welche hier den Körper wie mit einem festgefügten Küraß umgeben, während die Hinterregion des Körpers von kleineren, feineren Schuppen bedeckt ist. Die Elemente des Placodermenpanzers mit den dermalen Belegknochen des Teleostomenkopfes und den Elementen des Schultergürtels zu homologisieren, ist nicht möglich.

Histologie der Panzerelemente. Die kleinen, ± spindelförmigen „Schuppen" der †Anaspida scheinen dicht gewesen zu sein.

Sehr verschiedenartig ist die Panzerung der †Heterostraci. Bei manchen (†Thelodus, †Lanarkia) trägt die Haut kleine, flache bis kegelförmige, an das Chagrin der Haie erinnernde Schuppen: ein Dentinmantel — zum Teil von Vitrodentin überzogen — umgibt eine Pulpahöhle (Fig. 3). Bei anderen

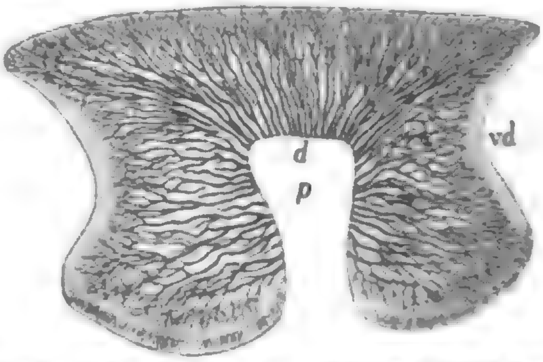


Fig. 3. †Thelodus sp. Vertikalschliff durch eine Schuppe, 90 mal vergrößert. d Dentin, p Pulpa, vd Vitrodentin. Obersilur. Nach Röse. Aus v. Stromer.

sind die Hautschuppen zu einer verschieden großen Zahl von Platten zusammengewachsen. Diese lassen bei den †Pteraspidae 3 Schichten erkennen: die basale Isopedinschicht aus dünnen, parallelen Lagen mit langspindelförmigen Knochenkörperchen; eine mittlere Schicht, deren ± homogene Grundmasse ein Haufwerk von groben Zellen und Kanälen enthält; die dritte, äußere Schicht besteht aus zum Teil mit dünner schmelzartiger Substanz überzogenen Dentinleisten, zwischen denen feine, nach außen ganz enge Kanäle entlang ziehen, welche mit den Zellen und Kanälen der Mittelschicht durch „Primitivröhrchen" in Verbindung stehen (Fig. 4).

[1]) Nur bei dem antiarchen †Bothriolepis sind im Schwanz Andeutungen von Verknöcherungen von Dornfortsätzen und Hämapophysen(?) zu erkennen.

Digitized by Google

Die Panzerplatten der †Osteostraci besitzen ebenfalls 3 verschieden struierte Lagen: der unteren Isopedinschicht mit zahlreichen, lang spindelförmigen Knochen-

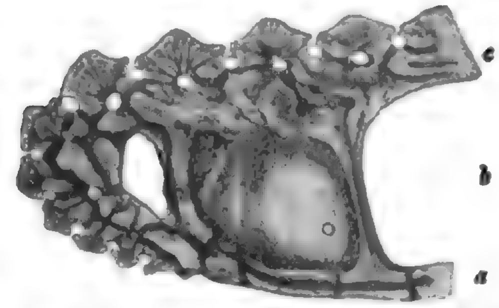


Fig. 4. †Cyathaspis(?) Schmidti E. Gein. Schliff durch den Rand des Dorsalschildes, 40 mal vergrößert. a geschichtete Innenlage, Isopedinschicht, b großzellige Mittelschicht, c Außenschicht mit durchschnittenen Dentinleisten. Obersilur; Gotland. Nach G. Lindström. Aus v. Stromer

körperchen liegt eine mit groben Zellen und Kanälen erfüllte Mittelschicht auf, und dieser die äußere Osteodentinschicht mit Knochenkörperchen und mit einem Ueberzug von schmelzartiger Substanz.

In den Panzerplatten der †Antiarchi zeigen die drei Lagen durchweg das Vorhandensein von Knochenkörperchen.

Die Histologie der Panzerung der Placodermen zeigt also die verschiedensten Stufen von dichter (?) Struktur über placoidähnliche Dentinschüppchen zu Knochenplatten.

1. Ordnung. †Anaspida, Traquair. Obersilur (Fig. 5).

Aus dem jüngeren Obersilur und aus den Uebergangsschichten zum devonischen Oldred von Lanarkshire (Südschottland) und aus Norwegen wurden durch R. H. Traquair zierliche spindelförmige Fischchen ohne paarige Flossen, mit ausgesprochen heterozerkem, tief ausgeschnittenem Schwanz beschrieben: †Birkenia Traq. und †Lasanius Traq. Bei †Birkenia (Fig. 5) ist der Schuppenpanzer besser bekannt: die Kopfregion (mit rundlicher Orbita?) ist von schlank spindelförmigen Schuppen bedeckt, die sich zu verschieden gerichteten Systemen (? Anfang zur Differenzierung verschiedener Platten) gruppieren; auf den Flanken sind die hohen Schuppen in bis 5 Längsreihen geordnet; dorsal oder ventral steht eine Medianreihe von Stachelschuppen (Jaekel deutet als Rücken, was Traquair Bauch nannte); gegenüber liegt eine niedrige, nach hinten gerückte Rücken- oder Afterflosse. Am Hinterende des Kopfabschnitts steht eine Schrägreihe von Kiemenlöchern (?). Bei †Lasanius kennt man hinter dem Kopf acht geknickte Knochen(?)-stäbe, die vielleicht einen Kiemenkorb andeuten (†Euphanerops A. S. Woodw. aus dem jüngeren Oldred [Devon] von Kanada mag auch hierher gehören).

2. Ordnung. †Heterostraci, Ray Lankester (†Pteraspidomorphi, Goodrich). Obersilur, unteres Devon (Fig. 6 bis 8).

Familien: †Coelolepidae (Obersilur, Devon), ?†Gemündenidae[1] (Unterdevon), †Drepanaspidae (Unterdevon), †Pteraspidae (Obersilur, Unterdevon).

Die 20 bis 50 cm langen Fische sind durch die meist breite, niedergedrückte Vorderregion ihres Körpers und durch die sehr viel schlankere und häufig scharf abgesetzte Hinterregion mit verschieden ausgebildetem heterozerkem Schwanz rochenähnlich gestaltet. Eine irgendwie sichere Scheidung von Kopf- und Brustregion ist nicht durchzuführen. Die Hautpanzerung besteht aus abgeflachten bis kegelförmigen dentinösen Schüppchen, welche dicht aneinander gelagert sind

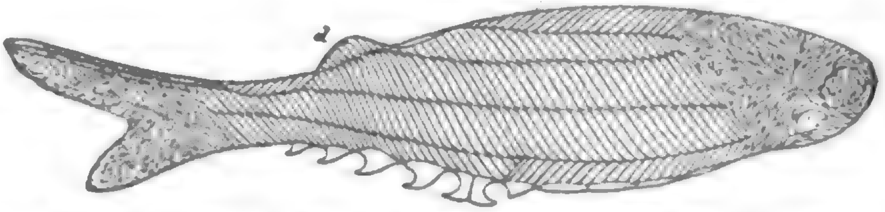


Fig. 5. †Birkenia elegans Traq. Rekonstruktion von Traquair, natürliche Größe. d Rückenflosse (nach Jaekel Afterflosse); am Hinterrande des Kopfpanzers eine Reihe Kiemenlöcher. Obersilur; Lanarkshire, Schottland. Aus Zittel.

(†Coelolepidae [Fig. 3. u. 6]), oder aus einem System polygonaler Täfelchen, zwischen die in der Vorderregion des Körpers eine Anzahl größerer Mittel- und Seitenplatten

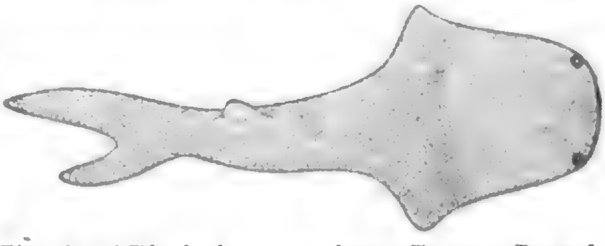


Fig. 6. †Thelodus scoticus Traq. Dorsalseite, Rekonstruktion von Traquair. Obersilur, Downton; Logan water, Lanarkshire, Schottland. Aus Zittel.

eingesenkt sind (†Drepanaspidae, Fig. 7); oder die Vorderregion ist von wenigen,

[1]) Vielleicht Elasmobranchier — nach fraglichen Andeutungen eines inneren Skeletts.

Digitized by Google

± massiven Panzerplatten — 1(?) bis 7 dorsalen, 1 ventralen — wie in ein festes Futteral eingeschlossen, während die Abdominalregion von feineren, zum Teil rhombischen Schuppen bedeckt war (†Pteraspidae, Fig. 8). Die heterozerke Schwanzflosse ist tief ausgeschnitten (†Coelolepidae) oder fächerförmig, hinten kaum gebuchtet (†Drepanaspidae), oder (vielleicht) heterozerk-oxyzerk (†Pteraspidae). Bei †Thelodus (†Coelolepidae) ist eine kleine dreiseitige Rückenflosse nachgewiesen.

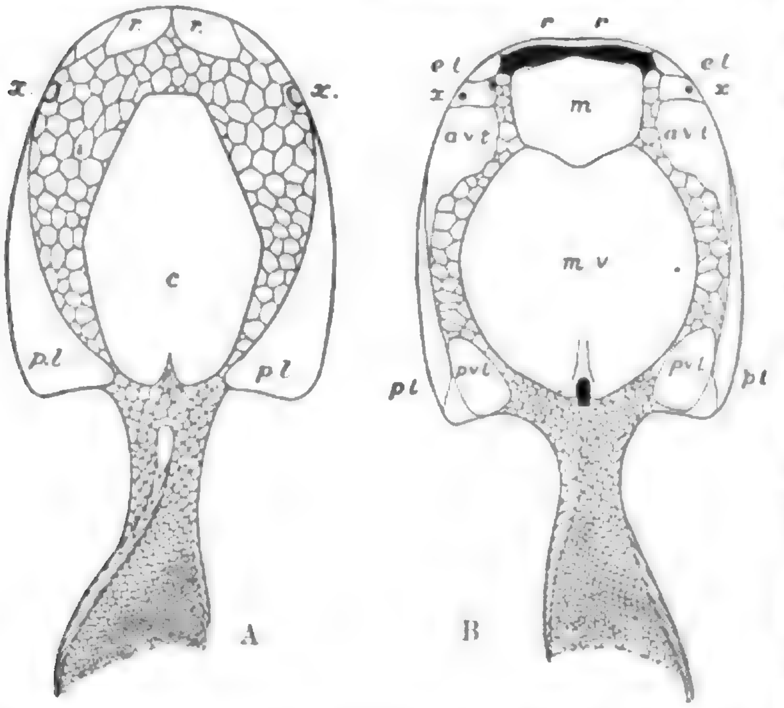


Fig. 7. †Drepanaspis gemündensis Schlüt. Rekonstruktion von Traquair, ca. $^1/_3$ natürliche Größe. A Dorsal-, B Ventralseite; avl vordere Ventrolateralplatte, c mittlere Dorsalplatte, el äußere Labialplatte, m „Mentalplatte", vordere Mittelplatte, mo mittlere Ventralplatte, pl hintere Seitenplatte, pvl hintere Ventrolateralplatte, r Rostrale, x Orbitalplatte (mit Auge?). Unterdevon, Bundenbach; Eifel. Aus Zittel.

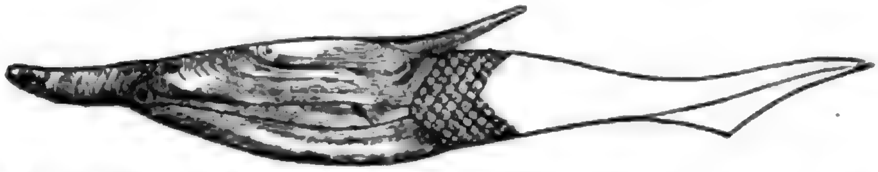


Fig. 8. †Pterapsis rostrata Ag. Rekonstruktion von A. Sm. Woodward; Seitenansicht, ca. $^1/_3$ natürliche Größe. Unterstes Oldred, Passagebeds; Herefordshire. Aus Zittel.

Ueber weitere Organisationsdetails ist sehr wenig bekannt. †Drepanaspis hat einen queren Mundspalt nahe dem Vorderrande der Ventralseite; bei den †Pteraspidae muß der Mundspalt ebenfalls ventral, aber infolge des großen Rostrums weiter vom vorderen Körperpol entfernt gelegen haben. Flache Querrippung der vorderen Körperregion von †Thelodus kann auf die Lage der Kiemenbögen hinweisen, ebenso eine Reihe paariger Eindrücke auf der Innenseite des Rückenschildes bei dem Pteraspiden †Cyathaspis. Ein Loch in den hinteren Seitenplatten von †Pteraspis wird als Kiemenöffnung gedeutet. Bei den †Coelolepiden und †Pteraspiden sind kleine seitliche, ziemlich weit vorn liegende Augen erkannt worden; bei †Drepanaspis wurden solche in randlich ventraler Lage angenommen, doch L. Dollo konnte es wahrscheinlich machen, daß diese Form blind war. Auf der Innenseite der Rückenpanzerung wurde bei den †Pteraspidae eine median liegende kleine Grube bemerkt, welche der Lage der Epiphyse (der Pinealdrüse, des „dritten Auges") entsprechen mag. Reihen von kleinen Poren auf dem Dorsalpanzer von †Pteraspis werden mit einem Seitenliniensystem in Verbindung gebracht.

Nach der Körperform und dem epibatischen Bau der heterozerken Schwanzflosse (mit stärkeren oberen Lappen) waren die meisten †Heterostraci Schwimmformen, die wohl vorwiegend in flachem, durchlichtetem Wasser in der Nähe des Bodens lebten, und deren Schwanzflosse sie im wesentlichen abwärts trieb; auch die ventrale Lage des Maulspalts spricht für Lebensweise in der Nähe des Bodens. †Drepanaspis darf um seiner Blindheit willen und nach dem Bau der Schwanzflosse dem vagilen Benthos angehört haben, mit dem Vorderende seines Körpers den Boden aufgewühlt haben. Auch †Pteraspis war trotz seines mehr spindelförmigen Körpers wohl im wesentlichen an die Bodennähe gebunden; das ventrale Maul, das starke, doch wohl den Boden aufpflügende Rostrum sprechen dafür.

Wenn die als †Heterostraci zusammengefaßten Fische eine genetische Einheit repräsentieren, dann ist bei ihnen wohl folgender Gang der Umformung und Anpassung anzunehmen (zum Teil nach Dollo): Aus leichter beweglichen, weil nur mit kleinen Schuppen (Hautzähnchen) gepan-

zerten, nektonischen Schwimmtieren, den †Coelolepidae mit randlich liegenden Augen, wurden auf der einen Seite die gröber gepanzerten, rein benthonisch lebenden †Drepanaspidae, auf der anderen

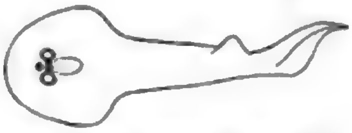


Fig. 9. †Ateleapsis tessellata Traq. Auf 1/3 verkleinerte Rekonstruktion des Umrisses der Oberseite, vor den genäherten Augen eine kleine antorbitale, hinter ihnen eine große postorbitale Grube, Schwanz gedreht, im Profil gesehen. Die Panzerung besteht aus ± gedornten Schuppen. Obersilur; Lanarkshire, Schottland.

Seite dieschwerstgepanzerten†Pteraspidae, welche aber trotz ihrer schweren Panzerung kaum schon als reine Benthostiere anzusehen sind, da sie noch ausgesprochen seitlich liegende Augen haben.

Die†Heterostraci entstammen zum Teil den an echten Meerestieren armen (± brakkischgewordenen) Gebieten des jüngsten Obersilur (Schottland), zum Teil küstennächsten Regionen des marinen Obersilur in Skandinavien, Galizien, Podolien, Nordamerika, ferner den Flachmeerbildungen des rheinischen Unterdevon und den limnischen Ablagerungen des älteren Oldred (Devon) Europas und Nordamerikas.

3. Ordnung. †Osteostraci, Ray Lankester (†Aspidocephali, Brandt; †Cephalaspidomorphi, Goodrich) (Fig. 9 bis 11).

Familien: †Ateleaspidae (Obersilur), †Cephalaspidae (Obersilur, Unterdevon), †Tremataspidae (Obersilur).

Aus den zum Teil nicht mehr rein marinen Ablagerungen des jüngeren Obersilur Schottlands, des Baltikums und aus dem Oldred von Schottland und Kanada kennt man eine Anzahl von Panzerfischen, welche durch die breite niedergedrückte Vorderregion, durch die meist scharf abgesetzte und schlanke Hinterregion wieder bis zu gewissem Grade den Rochen (auch manchen Panzerwelsen) ähnlich gestaltet sind; die Aehnlichkeit mit den meisten Rochenformen wird noch erhöht durch die Lage der Augen: nahe aneinander gerückt stehen sie auf der Mitte der Kopfoberseite. Die Schwanzflosse ist heterozerk-oxyzerk mit dreiseitigem unterem Segel; von einzelnen ist eine dreiseitige Rückenflosse bekannt.

Die Panzerung ist, wie bei den †Heterostraci, in verschiedenen Stadien der Verfestigung zu erkennen (Histologie s. oben). Bei den †Ateleaspidae (Fig. 9) ist der breite Vorderteil mit lappigen, gerundeten, hinteren Seitenecken von polygonalen Plättchen bedeckt, Rumpf und Schwanz von hohen rhombischen Schuppen. Bei den übrigen Familien ist der Panzer der Vorderregion starr.

Die Vorderregion der †Cephalaspidae (†Cephalaspis Ag. [Fig. 10], †Thyestes Eichw. = Auchenaspis Egert., †Eukeraspis R. Lank., †Didymaspis Egert.) wird meist von einem einzigen parabolischen, flachen Schild bedeckt, dessen Hinterecken (auch der mediane Hinterrand) in größere Hörner ausgezogen sind; unter dem kantigen, flachen Rand greift dieser Rückenschild etwas auf die sonst ungepanzerte Unterseite über. Der Aufbau des Schildes durch Zusammenwachsen aus zahlreichen Täfelchen ist bei †Cephalaspis selbst klar zu erkennen; bei †Thyestes ist eine Anzahl von medianen Rückenschuppen mit dem Kopfschilde verschweißt. Der höhere Rumpf von fünfseitigem Querschnitt trägt bis in die Schwanzregion Reihen hoher Schuppen, die zum Teil in der Vorderregion ebenfalls als durch Konkreszenz kleinerer entstanden erkennbar sind; vor der Rückenflosse liegt dachziegelartig eine Medianreihe stärkerer Schuppen.

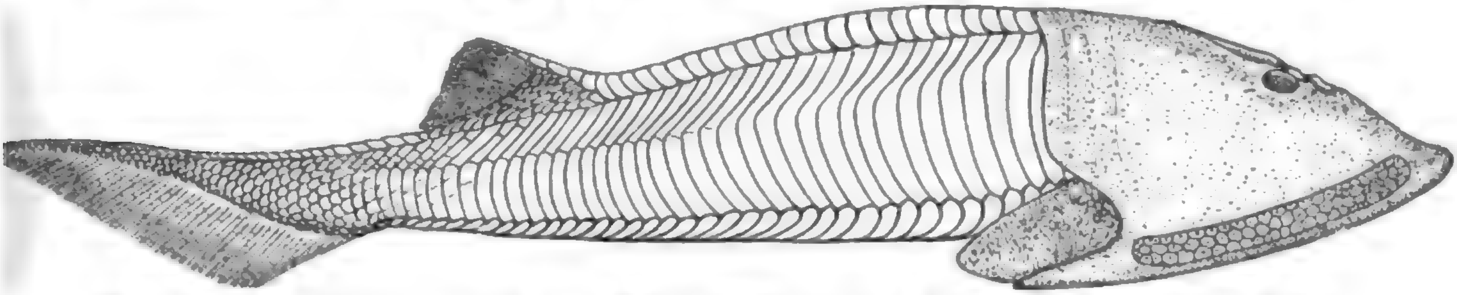


Fig. 10. †Cephalapsis Lyelli Ag. Rekonstruktion von v. Stromer, 2/3 natürliche Größe. Unterdevon, Oldred; Forfarshire, Schottland. Aus v. Stromer.

Bei den†Tremataspidae (†Trematas-pis Fr. Schm., Fig. 11) setzt der ovale Rückenschild auch über die Unterseite und bildet so ein einheitliches Futteral, auf dessen Unterseite in einen weiten Ausschnitt hinter dem breiten, queren, ventralen, aber nahe dem Vorderende gelegenen Maulspalt ein Mosaik unregelmäßigerer Platten eingefügt ist.

Eigentümlich ist bei †Cephalaspis ein

Digitized by Google

Paar lappenartiger Anhänge am Hinterrande des Dorsalschildes neben den Hörnern desselben. Sie sind geschuppt, hängen nach A. Smith Woodward direkt mit der mittleren Lage des Rückenpanzers zusammen; sie können also keine paarigen Flossen sein (Schutz für Kiemen?).

In der kleinen Interorbitalplatte der

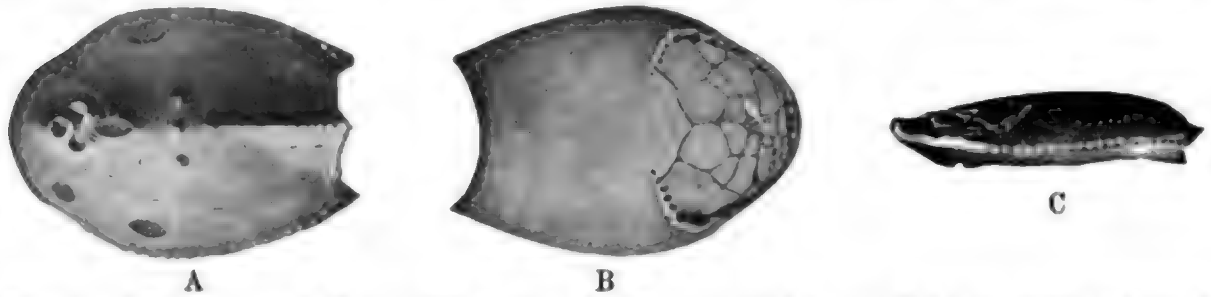


Fig. 11. †Tremataspis Schmidti Schrenk. Rekonstruktion von Patten. A Dorsalseite mit prä- und postorbitalen sowie 2 Paaren seitlicher Gruben, mit Schleimkanälen, B Ventralseite, Plattenmosaik hinter dem queren Maulspalt, Kiemenlöcher (?) am Vorderrande der Rumpfplatte, C Flankenansicht. Jüngstes Obersilur; Rotziküll, Oesel, Russische Ostseeprovinzen. Aus Zittel.

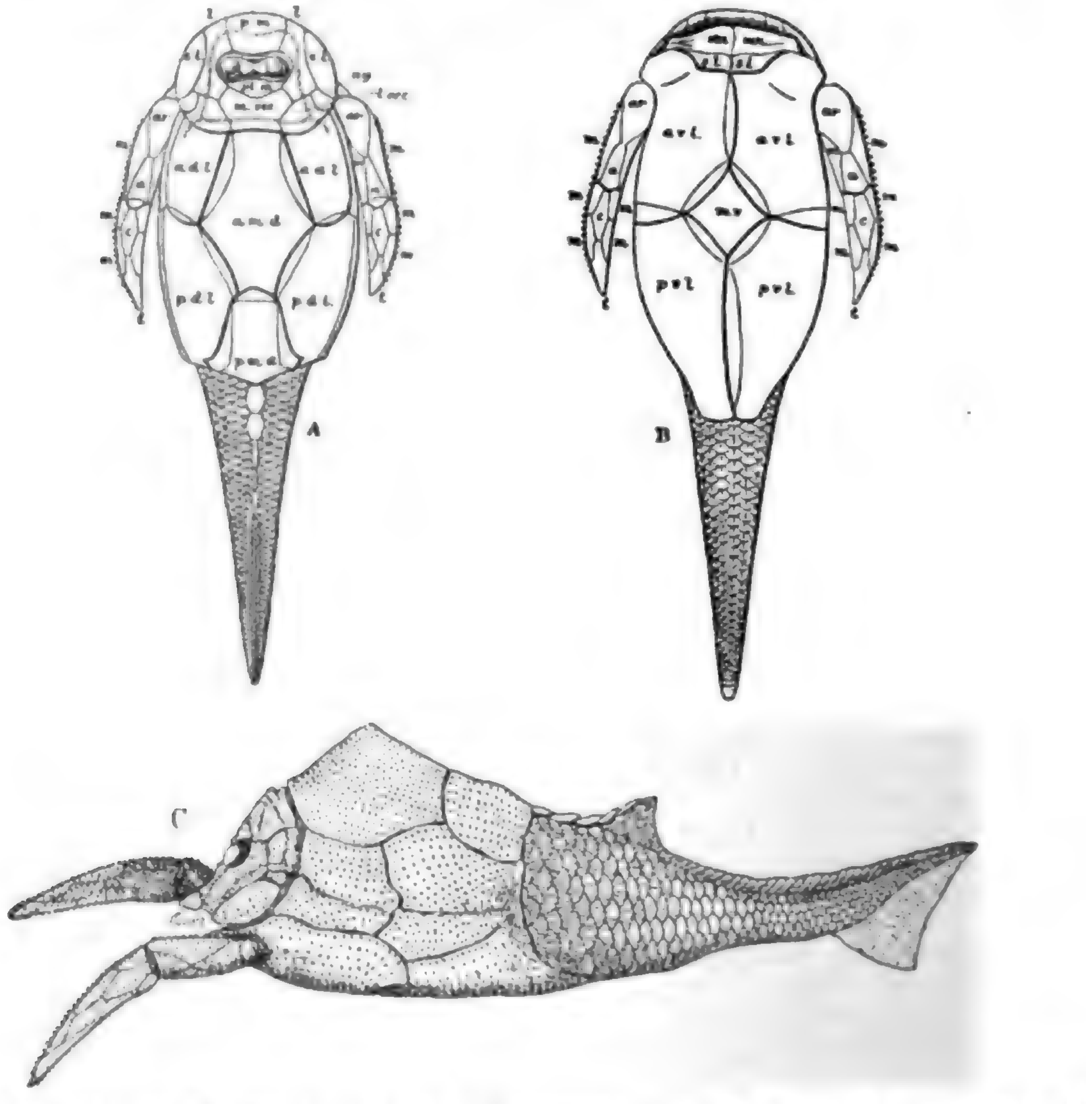


Fig. 12. †Pterichtys Milleri Ag. A und B Rekonstruktion der Ober- und Unterseite nach Traquair, C Seitenansicht mit vorgestelltem „Ruderorgan“ nach Abel. ca. ½ natürliche Größe. Mittlerer Oldred, Devon; Schottland. Kopfplatten: ag angulare, l laterale, locc seitliche occipitale, mocc mittlere occipitale, pm mittlere präorbitale, ptm mittlere postorbitale Platte. Halsbrustpanzer, Oberseite: adl vordere dorsolaterale (Operculare), amd vordere dorsomediale (Nuchale), pdl hintere dorsolaterale (Cleithrale), pmd hintere dorsomediale (Postnuchale) Platte. — Unterseite: avl vordere ventrolaterale (Claviculare), mn mentale, mo mittlere ventrale (Interclavicula), pvl hintere ventrolaterale (Postclaviculare), sl semilunare Platte. Ruderorgan: a, ar, c, m, t vordere, obere, seitliche, terminale Platten. A, B aus Zittel, C aus Abel.

Digitized by Google

†Tremataspidae ist die Andeutung einer Epiphyse gegeben. Eine mediane Grube oder Oeffnung vor den Augen wird als Riechgrube gedeutet. Die Deutung einer medianen Grube hinter den Augen und paariger seitlicher Gruben mit getäfeltem Grunde bei den † Tremataspiden und ähnlich struierter Felder bei den † Cephalaspiden, sowie einzelner Poren ist ganz unsicher. Andeutungen des Kiemenapparates sind erkennbar: Eindrücke auf der Innenseite des Dorsalschildes und Einschnitte am ventralen Umschlag von † Cephalaspis, eine Reihe von Löchern rechts und links zwischen dem ventralen Schilde und dem postoralen Plattenmosaik bei † Tremataspis (Patten wollte hier Ansatzstellen gegliederter Füße sehen). Auf dem Dorsalschild von †Tremataspis wies Patten verzweigte Schleimkanäle nach.

Die ganze Form und Organisation der †Osteostraci läßt sie als Grundfische erkennen; Form und Bau des Rückenschildes wie der Schwanzflosse von †Cephalaspis sprechen für wühlende Lebensweise.

Durch die Aehnlichkeit des Dorsalschildes von †Cephalaspis mit dem Cephalon mancher †Trilobiten (†Asaphidae) oder des Xiphosuren Limulus ist wohl hauptsächlich der Versuch Pattens, Steinmanns und anderer hervorgerufen, die †Osteostraken als Nachkommen der † Trilobiten oder xiphosurenartiger Arthropoden zu erklären. Weder die Histologie der Panzer noch irgendein Organisationsdetail kann solche Annahme stützen.

Vielleicht besteht zwischen den †Heterostraken und †Osteostraken durch †Thelodus und †Ateleaspis Verwandtschaft? Wenn weiter die 3 Familien der †Osteostraken nicht nur durch gleiche Lebensweise konvergent geworden sind, und wenn auf gleiche Histologie der Panzerung nähere Verwandtschaft mit zu begründen ist, dann könnten die † Cephalaspidae wie die †Tremataspidae unter dem Prinzip vorschreitender Verfestigung des Panzers (welche für im Schlamm wühlende Lebensweise besonders vorteilhaft werden mußte) aus †Ateleaspis oder aus diesem ähnlichen Formen hervorgegangen sein.

4. Ordnung. †Antiarchi, Cope (†Pterichthyomorphi, Goodr.) (Fig. 12).

Familie: †Asterolepidae (†Asterolepis Eichw., †Pterichthys Ag., †Bothriolepis Eichw., †Microbrachium Traq.). Devon.

Wesentlich weitergehende Differenzierung der Panzerung als die Angehörigen der vorigen Ordnungen kennzeichnet die devonischen †Antiarchi (Fig. 12). Eine größere Anzahl von massiven Knochenplatten bedeckt einen vorderen, ± gerundet vierseitigen Kopfabschnitt, dessen runde Augenöffnungen nahe der Mittellinie auf der Oberseite sitzen. Vom Kopfpanzer scharf getrennt folgt ein viel umfangreicherer, im Querschnitt ± fünfseitiger Rumpf- oder Halsbrustpanzer aus 2 Gürteln massiver Knochenplatten; an den vorderen Gürtel gelenken die eigentümlichen, von zahlreichen kräftigen Platten umschlossenen, zugespitzten Seitenanhänge, die „Ruderorgane“. Die Panzerplatten sind auf der Oberseite höckerig bis maschig verziert; die Ränder der „Ruderorgane“ können mit spitzen Zacken besetzt sein.

Der hintere, der Rumpf-Schwanzabschnitt, ist bei †Pterichthys und †Asterolepis mit ± gerundeten, skulpturierten Schuppen bedeckt (bei †Bothriolepis nackt?). Der Rücken trägt eine kurze, dreiseitige (bei †Bothriolepis lappige?) Flosse, deren Vorderrand mit kräftigen Fulkren besetzt ist. Der Schwanz läuft in eine schlanke, heterozerk-oxyzerke Flosse mit dreiseitigem unterem Segel aus.

Die Panzerung der Kopfoberseite besteht aus einer mittleren Reihe von 4 unpaaren Platten und aus je 4 paarigen Seitenplatten, für welche Traquair und andere indifferente Lagebezeichnungen wählten, während Jaekel sie mit den Knochen des Schädeldaches der übrigen Fische resp. auch der † Stegocephalen homologisiert. Topographisch läßt sich das wohl durchführen, für ein wirkliches Homologisieren fehlt aber jede sichere Grundlage. Zwischen den runden Augenöffnungen liegt ± lose eine kleine, 4seitige Platte (os dubium Pander, median plate Traq., Frontale Jaek.) mit einer Epiphysengrube.

Ein gelenkartiger Vorsprung an der inneren hinteren Seitenplatte des Kopfes gibt die einzige Verbindung zwischen Kopf- und Halsbrustpanzer, zwischen denen beiden ein enger Spalt klafft, durch welchen vielleicht Wasser Zutritt zu den Kiemen hatte (?). Je 5 Platten — 1 dorsale, 2 laterale und 2 ventrolaterale — bilden die beiden Gürtel des Halsbrustpanzers; Die Seiten- und Ventralplatten will Jaekel mit den Knochen des Operkularapparates und des Schultergürtels der Fische homologisieren; eine zwischen beiden Gürteln liegende, rhombische Ventralplatte nennt er Interclavicula. Auch diese Homologisierungen stoßen auf Schwierigkeiten; die beiden dorsalen Platten mußte Jaekel mit indifferenten Namen — Nuchale und Postnuchale — belegen.

Die Panzerplatten stoßen in schrägen, bei verschiedenen Gattungen verschieden gerichteten Ueberlagerungsflächen aneinander.

Ueber die lateralen Halsrumpfplatten ziehen gerade Schleimkanäle, welche auf den Platten des Kopfpanzers in nicht unerheblich

anderer Weise verlaufen als sie es sonst bei Fischen tun.

Vor den vorderen Ventralplatten liegen quergestellte Plättchenpaare (Semilunar- und Mentalplatten), deren Beziehungen zum Maulspalt unsicher sind. Jaekel glaubte einmal bei einem schottischen †Asterolepis Spuren unbezahnter Kiefer und einen kurzen Maulspalt zu sehen.

Weit vorn an den vorderen Ventrolateralplatten (Claviculae Jaekel) gelenken durch ein höchst eigenartiges, in gleicher Weise bei Wirbeltieren nicht wieder beobachtetes „Sperrgelenk" die „Ruderorgane". In einer ovalen Grube der Halsplatte trägt eine schräglängsgestellte Knochenleiste einen helmartigen Gelenkkopf. Dieser wird von den ± halbkreisförmigen Fortsätzen der oberen und unteren „Gelenkplatten" (ar Fig. 12 A, B) des proximalen Anhangteils umfaßt. Nerven- und Gefäßlöcher in der Halsplatte vermitteln den Konnex zwischen den Weichteilen des Körpers und den von den Panzerplatten des Anhangs eingeschlossenen. Der ganze Anhang konnte bei der genannten Gelenkungsart im wesentlichen nur vorwärts und rückwärts bewegt werden und zwar in nicht allzu viel von der Horizontalen abweichender Richtung. Der Distalteil des Ruderorgans war in einem „Ellenbogengelenk" gegen den proximalen beweglich, doch nur in der Horizontalebene und meist nur wenig weit. Als wirkliche Ruderorgane können diese Anhänge den Tieren kaum irgendwie gedient haben. Ebensowenig werden die †Antiarchi mit ihrer Hilfe gar auf geknickten „Ellenbogen" gekrochen sein (Simroth nahm das an). Zum Teil mögen sie lediglich als Balancemittel gedient haben; dann könnten sie wohl auch die Bedeutung von Schreckwaffen oder Waffen überhaupt gehabt haben; vielleicht dienten sie auch zum Festhalten von Beutetieren? Weder mit Armen, noch mit Brustflossen lassen sich die Ruderorgane ungezwungen homologisieren. Jaekel meint, sie könnten aus den Hörnern des Kopfschildes der †Cephalaspidae oder aus den Hinterecken der †Drepanaspidae geworden sein. Goodrich vergleicht sie mit den lappigen Anhängen am Hinterrande des Cephalaspidenschildes.

Die phyletische Stellung der †Antiarchi wird höchst verschieden aufgefaßt. E. D. Cope sah in ihnen Verwandte der Tunikaten. Wie manche älteren Autoren, hält sie Patten mit den †Osteostraci für Abkömmlinge von Arthropoden und bringt sie in Verbindung mit †Trilobiten, Xiphosuren, †Gigantostraken. Ihrem ganzen Bau nach sind sie Wirbeltiere. Nur das bleibt zu diskutieren, ob sie als echte Fische oder etwa nur als fischähnliche andere Wirbeltiere aufzufassen seien. Ihre Beziehungen zu den †Osteostraci können trotz der sehr ähnlichen Histologie des Panzers keine allzu engen sein; denn die gleiche Lage der Augen wie bei †Cephalaspis kann kaum anders denn als Resultat gleicher Anpassung gedeutet werden. Vielleicht stehen sie in engeren Beziehungen zu den †Heterostraci? Wenigstens ließe sich aus der größeren Zahl der Panzerplatten das entnehmen.

Die †Antiarchi waren — das Seitenliniensystem würde dafür sprechen, selbst wenn die Rücken- und Schwanzflossen von †Asterolepis z. B. unbekannt wären — Wasserbewohner. Ihre flache Ventralseite, ihre nahe der Kopfmitte sitzenden Augen beweisen sie als Grundfische. Ihre Kiefer- und Zahnlosigkeit kennzeichnet sie (trotz der spitz gestachelten „Ruderorgane") als Friedfische, die im wesentlichsten wohl nur von Kleinorganismen des Bodens lebten.

Die meisten Funde der höchstens wohl ca. 40 cm messenden Formen entstammen dem devonischen Oldred Schottlands, der russischen Ostseeprovinzen und des südöstlichen Kanada. Ganz vereinzelte Funde wurden im marinen Mitteldevon des rheinischen Schiefergebirges, etwas zahlreichere in den marinen Domanikschiefern des Oberdevon im Timan gemacht.

C. Unterklasse: †**Arthrodira**, Cope (†Coccosteomorphi, Goodr.) (Fig. 13 bis 17).

Als Zeit- und zum Teil auch als Ortsgenossen der † antiarchen Placodermen begegnet uns ein diesen in vielem ähnelnder Fischtyp, die †Arthrodira. Meist grobe Knochenplatten panzern den Kopf und den bei den meisten durch einen ± weiten dorsalen Spalt geschiedenen Hals-Brustabschnitt; der in einen schlanken Schwanz mit diphyzerkem oder (?) heterozerkem Flossensaum auslaufende Rumpf scheint nackt gewesen zu sein, oder er war bei manchen durch dünne Schuppen geschützt. Der Besitz von „Kiefern" mit schneidenden und gezackten Rändern, seltener mit flach gestellten „Zahnplatten", Verkalkungen der oberen und unteren Bögen der knorpeligen Wirbelsäule, der — nicht unbestrittene — Besitz von paarigen Flossen zeichnet sie besonders aus.

Die gewaltigsten Fische des Paläozoikums gehören zu den †Arthrodira. Bei †Dinichthys und †Titanichthys sind Schädelpanzer von mehr als 1 m Länge und noch größerer Breite gemessen; andere Formen sind mittelgroße bis kleine Fische.

Die Knochenplatten des Kopfpanzers[1])

[1]) Die Angaben über die Panzerung sind im wesentlichen nach der bestbekannten Gattung †Coccosteus gemacht.

Digitized by Google

Fig. 13. †Coccosteus decipiens Ag. Rekonstruktion des Skeletts von v. Stromer (größtenteils nach Jaekel und Traquair), kaum ½ natürliche Größe (Becken und Afterflossenbasis unsicher). Unterdevon, Oldred; Schottland. Aus v. Stromer.

werden meist mit Lagebezeichnungen benannt; Jaekel homologisiert sie mit den Elementen des normalen Fischschädels:

In der Mediane liegen teils unpaare Platten: hintere Mittelplatte (Supraoccipitale), Pinealplatte (Frontale) mit Epiphysenloch oder -grube, Rostralplatte (Ethmoidale, Nasale), teils paarige: Centralia (Parietalia) zwischen der hinteren Mittelplatte und dem Pineale.

Seitlich liegen paarige Platten: hinten rechts und links Exoccipitale (Epioticum), Marginale (Supratemporale): in der Umrahmung der Orbita rechts und links: Präorbitale (Präfrontale), Postorbitale oder auch Centrale 2 (Postfrontale), Suborbitale oder Maxillare (Jugale). Die meist recht großen Augenhöhlen liegen weit vorn; einige Male ist ein grober, meist wohl vierteiliger Sklerotikaring nachgewiesen. Die Rostralplatte kann wie bei †Coccosteus und Oxyosteus ± weit vorgestreckt sein (mit Nasenöffnungen? versehen).

Besonders auffallend sind am Kopfskelett dermale Knochenplatten („Gnathalia"), die nach Lage und Ausbildung als Kiefer fungierten. Unter der großen Suborbitalplatte (oft Maxillare genannt) liegen 2 dem Maxillare und Prämaxillare (oder den Vomeres und Palatina) gleichgelagerte Knochen. Zu ihnen tritt ein „Unterkiefer": rechts und links je ein großer Knochen; sie stoßen in einer, bei manchen gezackten, Symphyse zusammen, in der sie nach Hussakof beweglich waren. Diesem letzteren Knochenpaar wurde meist die Unterkiefernatur abgesprochen; Jaekel aber glaubt an einem †Pholidosteus Friedeli ein Articulare (als Aequivalent des Meckelschen Knorpels, nur außen schwach verknöchert), ein Angulare und Spleniale nachgewiesen zu haben. Trifft das zu, dann ist

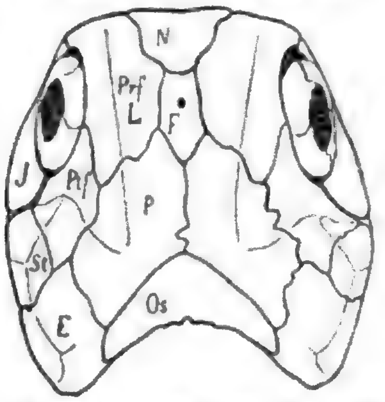


Fig. 14. †Pachyosteus bulla Jaek. Kopfpanzer von oben, mit Plattenbezeichnung nach Jaekel: E Epioticum, F Frontale, J Jugale, N Nasale, Os Supraoccipitale, P Parietale, Prf Präfrontale oder Lacrimale, Ptf Postfrontale. Marines Oberdevon; Wildungen. Nach Jaekel. Aus Zittel.

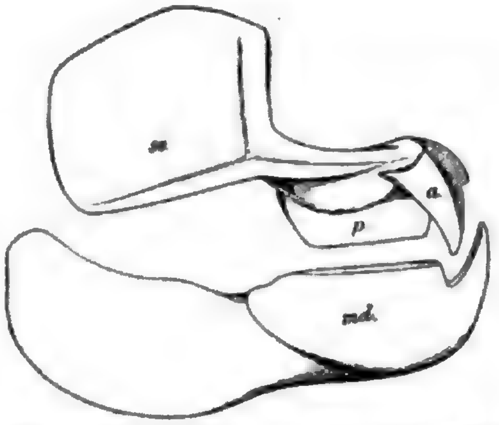


Fig. 15. †Dinichthys intermedius Newb. Kieferapparat rechts, von außen. Stark verkleinert. a vordere, p hintere Zahnplatte des Oberkiefers, md Mandibel, so Suborbitalplatte mit Schleimkanälen. Oberdevon; Ohio. Nach A. Sm. Woodward. Aus Zittel.

echte Unterkieferbildung zweifellos. Eigentümlich ist die Bezahnung der Kiefer: nicht dentinöse Zahnbildungen, sondern lediglich Zuschärfungen und Zackungen der Knochenränder sind beobachtet; die Zähne der „Oberkiefer" greifen über die der „Unterkiefer" hinüber. Das meist schneidende

Digitized by Google

Gebiß ist bei manchen (†Mylostoma) durch Ausbildung von breiten Platten zu einem knackenden, quetschenden geworden.

Der (bei †Macropetalichthys und einigen anderen nicht nachgewiesene und nach Eastman hier wohl auch fehlende) Hals-Brustpanzer zeigt auf der Ventralseite auffallende Aehnlichkeit mit dem der †Antiarcha. Dorsal ist nur eine Platte vorhanden (mittlere Dorsalplatte, das Nuchale

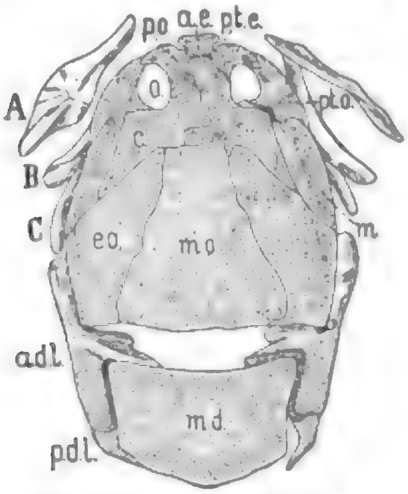


Fig. 16. †Homosteus Milleri Ag. Kopf- und Halsbrustpanzer, ¼ natürliche Größe. A, B, C unbestimmte Knochen, adl vordere dorsolaterale (Collare), ae ethmoidale oder nasale, c zentrale oder parietale, eo äußere occipitale oder epioticale, md mittlere dorsale (Nuchale), mo mittlere occipitale, pdl hintere dorsolaterale (Supracleithrale), po präorbitale, pte pineale oder frontale, pto postorbitale Platte. Devon, mittleres Oldred; Caithness, Schottland. Nach Traquair. Aus Zittel.

oder Cervicale Jaekels), die hinten auf ihrer Unterseite einen vertikalen Fortsatz tragen kann, über welchem Jaekel eine Nackenflosse konstruiert. Darunter folgen 2 Paare seitlicher Platten: oben vorn ein größeres Collare, dahinter das kleinere Suprascapulare oder Supracleithrale Jaekels; darunter vorn das größere Cleithrale oder Operculare Jaekels und hinten das an seinem Hinterrande tief ausgeschnittene Scapulare oder Cleithrale Jaekels. Ventral liegen zwei größere Plattenpaare, die vorderen und hinteren Ventrolateralia (Claviculae und Postclaviculae Jäckels), sie umschließen eine ± rhombische Mittelplatte (Interclavicula), und zwischen das vordere Plattenpaar ist von vorne her eine mehr fünfseitige Medianplatte (Präclavicula) eingeschoben. Vor diesem Plattensystem lagert auf der Ventralseite ein Paar spangenförmiger Knochen, die quergestellten Interlateralia (Jaekels Jugularia). Die von Jaekel vorgenommene Homologisierung der Platten des Hals-Brustpanzers mit den Elementen des Schultergürtels der Fische liegt natürlich nach Lage der Knochenplatten nahe, sie bleibt hier aber ebenso hypothetisch wie bei den †Antiarchi. Zwischen Clavicula und Cleithrum Jaekels schiebt sich nahe dem Vorderrande des Hals-Brustgürtels ein kürzerer oder längerer, ungeteilter Knochenstab ein (Jaekels Spinale). Vielfach wird dieser mit dem „Ruderorgan" der †Antiarchi homologisiert; Jaekel brachte ihn einmal auch mit Radii branchiostegi in Verbindung. Bei manchen Formen (†Acanthaspis, †Phlyctaenaspis) liegt der Seitenstachel zum größten Teil seiner Länge den „Claviculae" an.

Zwischen dem Kopf- und Hals-Brustpanzer existiert eine Gelenkverbindung: Am Vorderrand des Collare greift ein vorgestreckter Gelenkkopf in eine entsprechende Grube am Hinterrande des „Epioticum". Ueber dieser Gelenkstelle klafft ein verschieden breiter Nackenspalt in der Panzerung, aus dem eine zum Teil recht erhebliche Beweglichkeit des Kopfabschnittes in der Richtung der Symmetrieebene gefolgert werden kann.

Die Panzerplatten sind meist gekörnelt bis feinhöckerig verziert; bei manchen, wie bei †Titanichthys sind sie glatt und waren dann wohl von der Körperhaut überzogen.

Ueber die Platten des Schädels zieht vom Collare her ein kompliziertes, bei verschiedenen Gattungen verschieden struiertes Seitenliniensystem hin.

Von der knorpelig angelegten Wirbelsäule sind obere und untere, verkalkte Bögen mit neuralen und hämalen Fortsätzen bekannt (†Coccosteus, †Dinichthys). Eine Jaekelsche Rekonstruktion gibt auch Rippen an, von denen sonst nichts nachgewiesen ist. Gegliederte Strahlen der Rückenflosse sind bekannt.

Aus dem weiten, hinteren Ausschnitt des Hals-Brustpanzers folgert Jaekel die Existenz paariger Brustflossen, und einmal will er sogar eine gegliederte, beschuppte Flossenachse erkannt haben; Belege hierfür sind bislang nicht publiziert. Weiter hinten, resp. in recht verschiedener Lage hinter dem Hals-Brustpanzer sind ± spatelförmige Platten beobachtet worden, welche meist als Becken gedeutet wurden. Strahlen unterhalb dieser Platten sollen die Existenz von Bauchflossen beweisen. Das hohe Becken sollte, mit der Wirbelsäule in Verbindung stehend, nach Jaekel auf eine Benutzung der Hinterextremität zurückweisen, welche ähnlich war, wie bei den Tetrapoden. Ein bei †Coccosteus beobachtetes, weiter zurückliegendes Plättchen wird als Träger einer Analflosse gedeutet. Bashford Dean bestritt die Existenz eines Beckens, paariger Flossen überhaupt; er sah in den diskutierten Platten, nach ihrer mit den dermalen Panzerknochen übereinstimmenden Struktur, Reste eines Hautpanzers und nicht Teile eines

Digitized by Google

inneren Skelettes. Die Form von Rumpf und Schwanz bleibt nach allem recht wenig sicher zu beurteilen. Es ist nur wahrscheinlich, daß einem relativ kurzen Rumpf ein langgezogener, wenn auch kaum peitschenförmiger Schwanz (wie ihn Jaekel einmal rekonstruierte) folgte; über den Rücken zog eine ziemlich hohe Rückenflosse; die Form der wahrscheinlich diphyzerken Schwanzflosse ist unbekannt.

Die verschiedene Ausbildung der von den meisten Formen nur mehr oder weniger unvollständig erhaltenen Panzerung läßt die Unterscheidung von 2 Ordnungen zu:

1. †Anarthrodira Dean. Hier fehlt die Hals-Brustpanzerung entweder vollkommen oder sie ist mit dem Kopfpanzer verwachsen (?). In der Mediane des Kopfpanzers treten nur unpaare Knochen auf (hintere Mittelplatte und Pineale, oder auch noch das Rostrale), durch welche die Centralia (Parietalia) beiseite gedrängt sind. †Macropetalichthys Norw. u. Ow. (Mitteldevon der Eifel und von Nordamerika). ?†Asterosteus Newb. (Devon, Nordamerika).

2. Ordnung: †Arthrodira s. str. Kopf- und Hals-Brustpanzer sind deutlich ausgebildet und getrennt. Im Kopfpanzer schieben sich die paarigen Centralia (Parietalia), manchmal auch die präorbitalen Platten zwischen die hintere Mittel- und die Pinealplatte.

Die weitaus überwiegende Mehrzahl der †Arthrodiren gehört hierher. Nach der verschiedenen Ausbildung der Panzerung lassen sich die vielen Typen in eine Anzahl von Familien ordnen, welche aber nicht besonders scharf zu definieren sind. Bei

Fig. 17. †Rhinosteus Traquairi Jaek. Marines Oberdevon, Wildungen. Rekonstruktion von Jaekel (Flossenformen unsicher!). ½ natürliche Größe.

†Acanthaspis Jaek. und †Phlyctaenaspis Traq. sind die kräftigen Seitenstacheln fast ganz an die vorderen Ventrolateralplatten gelegt. Ungemein zahlreich sind besonders aus dem oberen Devon der Gegend von Wildungen Formen bekannt geworden, welche sich ± enge an †Coccosteus Ag., Fig. 13, anschließen (†Brachydirus v. Koen., †Pachyosteus (Fig. 14), †Oxyosteus, †Rhinosteus Jaek. (Fig. 17) u. a. m.). Aus dem Devon Nordamerikas (seltener aus Europa) sind die Riesenformen von †Dinichthys Newb. und †Titanichthys Newb. bekannt. Im nordamerikanischen Devon treten auch die durch wenige Pflasterzähne besonders ausgezeichneten, wenigen Arten von †Mylostoma Newb. auf. †Homosteus Asm. (Fig. 15) hat einen wenig gegen den Hals-Brustpanzer beweglichem Kopfpanzer, besonders große hintere Kopfplatten, große Orbitae, an deren Umrandung auch die Centralia (Parietalia) teilnehmen (Devon, Europa).

† Ptyctodontidae A. Sm. Woods. Aus dem Devon Nordamerikas und Europas sind verschiedentlich große, seitlich komprimierte Zahnplatten bekannt geworden, welche teils an die „Kiefer" von †Arthrodiren, teils an die Zähne von Chimaeriden (durch das Vorkommen von Tritoren, Reibinseln) erinnern — †Ptyctodus, †Rhynchodus Newb., †Rhamphodus Jaek. Von letzterer Gattung konnte Jaekel einen „Schultergürtel" beschreiben, der durch ein Collare, großes Cleithrum, große Clavicula und durch einen zwischen Cleithrum und Clavicula eingeschalteten Seitenstachel viele Uebereinstimmung mit dem Hals-Brustpanzer der †Arthrodira aufweist. Diese Reste wurden teils direkt zu den Chimaeriden gestellt, teils mit den Stören in Verbindung gebracht; nach L. Dollo sind sie am besten an die †Arthrodira anzuschließen.

Die †Arthrodiren waren teils Bewohner der Oldredgebiete des Devons, teils aber sind sie auch aus echten Meeresablagerungen der Devonzeit bekannt geworden. Namentlich im marinen Devon des rechtsrheinischen Schiefergebirges, besonders im oberen Devon der Gegend von Wildungen, wurde eine Menge von †Arthrodiren, vorwiegend Verwandte von †Coccosteus, gefunden. Als Anpassung an das Leben im Meer ist bei diesen Formen die Panzerung dünner, wesentlich leichter als bei den aus dem Oldred der russischen Ostseeprovinzen, Schottlands und Nordamerikas bekannten Formen; immerhin kommen auch in marinen Gesteinen gröber gepanzerte Reste vor, wie die großen, dicken Panzerplatten von †Aspidichthys Newb. aus dem Devon des Sauerlandes beweisen. Bei den Formen der Oldredfazies scheint die vordere Körperregion im allgemeinen niedergedrückter gewesen zu sein, als bei denen aus rein marinen Bildungen.

Die systematische Stellung der †Arthrodira ist eine ganz ungemein umstrittene. Abgesehen davon, daß sie gar nicht den Fischen zugerechnet worden sind, wurde es versucht, sie mit den verschiedensten Gruppen von Fischen

in Verbindung zu bringen, bei welchen Versuchen manche der Autoren sich lebhaften Wechsels ihrer Ansichten befleißigten. Sie wurden mit den Teleostomen in Verbindung gebracht (Huxley, Traquair, Tate Regan) mit den Chimaeriden (z. B. von Jaekel), mit den Dipnoern (Newberry, Eastman), mit den Stören (Jaekel), mit den †Antiarchi unter den †Placodermen (M'Coy, Pander, Huxley, Jaekel, Regan, Hussakof).

Die Verbindung mit den Dipnoern wurde in jüngerer Zeit besonders von Eastman auf Grund der Bezahnung von †Mylostoma lebhaftest befürwortet. Die Aehnlichkeit der Zahnplatten dieser Arthrodiren mit denen der Dipnoer beweist ausschließlich gleiche Ernährung, das Zerknacken hartschaliger Beutetiere; die aus Trabekulardentin gebauten Zähne der Dipnoer sind etwas durchaus anders als die Kauplatten von †Mylostoma. Die vermutete Hyostylie der †Arthrodiren müßte erst erwiesen werden. Auch die Aehnlichkeit des Schädeldaches des lebenden Ceratodus mit dem von †Dinichthys ist nicht zu hoch anzuschlagen, wenn man an die sehr zahlreichen Platten denkt, welche den Schädel eines devonischen Dipnoers (†Dipterus) bedecken. Schließlich ist nichts den paarigen Flossen der Dipnoer im Bau gleichendes bei den †Arthrodiren nachgewiesen. Für etwaige Beziehungen zu Chimaeriden ist, selbst von der Panzerung der †Arthrodiren abgesehen, nichts irgendwie Beweisendes zu ergründen.

Die Möglichkeit, daß die †Arthrodira irgendwie mit den †Placodermi verwandt seien, ist nicht ganz von der Hand zu weisen, wennwohl es schwer ist, selbst zu den ihnen äußerlich ähnlichsten †Antiarchi bestimmte Verbindungslinien zu konstruieren. Bei beiden ist die Hals-Brustpanzerung sehr ähnlich, aber wie das „Ruderorgan" der †Asterolepiden zu dem Seitenstachel der †Arthrodira, die Kieferlosigkeit der ersteren zu den Kieferbildungen der letzteren in natürliche Beziehung zu bringen wäre, ist vorläufig ganz ungeklärt.

Am richtigsten dürfte es sein, die †Arthrodira als eine selbständige Unterklasse der Fische aufzufassen, welche durch ähnliche Lebensweise, als Grundbewohner, in Form und Panzerung den †Asterolepiden unter den †Placodermen ± konvergent geworden sind.

D. Unterklasse: **Elasmobranchii**, Bonap. (Chondropterygii, Cuv.).

Die hier als Elasmobranchier im weiteren Sinne (vgl. Zoologischer Teil, S. 1097) zusammengefaßten Fische gehören mit zu den ältesten Vertretern des Fischstammes, welche uns bekannt sind: Als †Onchus Ag. wurden aus dem Obersilur einige „Ichthyodorulithen", Flossenstacheln, beschrieben, welche vermutlich dem alten Haityp †Acanthodes angehören. Eindeutige Reste sind seit dem Devon bekannt. Die Elasmobranchier sind dadurch von Interesse, daß manche ihrer Gattungen recht langlebig sind: †Acanthodes vom Silur bis zum Perm, Notidanus und andere vom Jura bis jetzt.

Die hier vereinigten Ordnungen sind: 1. †Acanthodi, 2. †Ichthyotomi, 3. Plagiostomi, 4. Holocephali.

a) Ordnung: †Acanthodi, Agassiz (Obersilur — Perm) (Fig. 18, 19, 20).

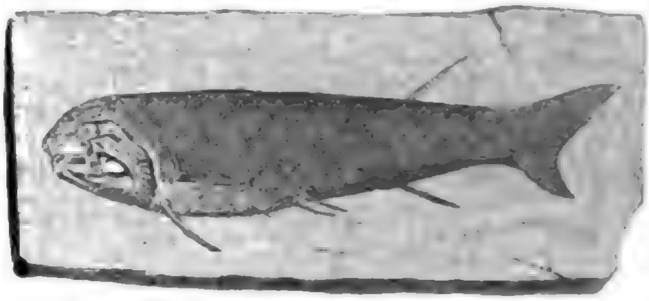


Fig. 18. †Acanthodes Mitchelli Eg. Natürliche Größe. Unterdevon, Oldred; Farnell, Schottland. Nach Egerton. Aus Zittel.

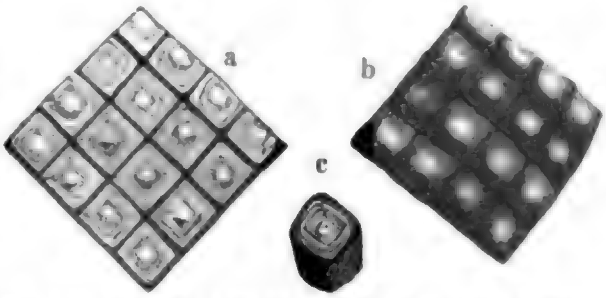


Fig. 19. †Acanthodes gracilis Beyr. Rumpfschuppen, vergrößert. a Außenseite, b Innenseite, c isolierte Schuppe. Perm, Rotliegendes. Aus Zittel.

Die zierlichen Fischchen von 5 bis ca. 25 cm Länge mit spindelförmigem Körper sind von den übrigen Elasmobranchiern durch manche ganz besonderen Merkmale unterschieden.

Der Körper ist mit einem dichten Pflaster kleiner, kaum stecknadelkopfgroßer, dicker, ± rhombischer Schuppen bedeckt, welche ganz wesentlich von den Placoidschuppen der Haie abweichen: Ihnen fehlt die Pulpa; sie werden aus parallelen Lagen dentinähnlicher Substanz (ohne Knochenzellen) aufgebaut, in welche feinste, wenig verzweigte Kanälchen dringen; ihre Außenlage wird von Schichten ganoinartigen Charakters, nicht von Schmelz gebildet. Diese Schuppen bedecken zum Teil auch die Flossen; auf dem Kopf werden sie durch ein dichtes Mosaik etwas größerer, ± rundlicher Schuppen ersetzt (bei †Acanthodes).

Am stumpfschnauzigen Kopf sitzt der lange Maulspalt fast terminal. Das Auge ist von einem Sklerotikaring aus wenigen, dentinähnlichen Platten umgeben. Außer einer heterozerken, epibatischen Schwanzflosse treten 1 oder 2 Rückenflossen auf, 1 Afterflosse und meist kräftig entwickelte Brust- und Bauchflossen. Mit

Digitized by Google

Ausnahme der Schwanzflosse ist der Vorderrand der ± dreiseitigen Flossen von einem kräftigen Flossenstachel, von gleicher Struktur wie die Schuppen, gestützt. Spekulativ nach der Richtung der „Seitenfaltentheorie" wurde öfters der Umstand ausgenutzt, daß bei mehreren †Acanthodiern zwischen Brust- und Bauchflosse überzählige Flossenstacheln vorkommen.

Am hyostylen Schädel, der etwas genauer nur von †Acanthodes bekannt ist, fallen wenigstens bei der jüngsten Art, †Acanthodes Bronni aus dem Perm, Palatoquadrat- und Mandibularknorpel dadurch auf, daß sie in getrennten Stücken verkalkt sind, zu denen am Unterkiefer noch ein als Spleniale (Jaekel), Ceratohyale (A. Sm. Woodward), „extramandibulärer" Stachel (O. M. Reis) gedeuteter Dermal„knochen" auftritt. Die spitzigen Zähnchen sind den Kieferrändern fest aufgewachsen. Fünf Kiemenbögen sind nachgewiesen, und fünf Kiemenspalten ohne Opercularapparat wahrscheinlich.

An der Wirbelsäule sind Spuren verkalkter oberer und unterer Bögen erkannt. Im Schultergürtel sind bogen- und plattenartige Elemente beobachtet, die ihrer Lage nach als claviculare und cleithrale Bildungen gedeutet wurden. Spuren von Flossenstrahlen wurden bei †Acanthodes erkannt.

Ueber die Flanken zieht eine deutliche Seitenlinie.

Nach der Zahl der Rückenflossen und nach dem Fehlen resp. Auftreten überzähliger Flossenstacheln lassen sich die wenigen Gattungen in 3 Familien einreihen.

Die †Acanthodidae besitzen nur eine Rückenflosse, überzählige Flossenstacheln kommen bei ihnen nicht vor. †Acanthodes Ag., Fig. 18, 19, Devon bis Perm (?†Onchus Ag. Obersilur), †Cheiracanthus Ag. (Devon), †Acanthodopsis Hanc. u. Atth. (Oberkarbon).

Die †Ischnacanthidae haben 2 Rückenflossen, keine überzähligen Flossenstacheln. †Ischnacanthus Powr. (Devon).

Für die †Diplacanthidae sind außer 2 Rückenflossen ein bis mehrere Paare von überzähligen Stacheln zwischen Brust- und Bauchflosse charakteristisch. †Diplacanthus, †Climatius Fig. 20, †Parexus Ag. (Devon).

Zum überwiegendsten Teil entstammen die †Acanthodier den devonischen Oldredablagerungen Europas; sehr viel seltener sind sie in denen Nordamerikas. Nur wenige †Acanthodes und †Acanthodopsis sind aus dem Karbon bekannt, †Acanthodes kommt dann noch im Rotliegenden (Unterperm) Deutschlands vor. — Die sicher deutbaren Reste (abgesehen von obersilurischen Flossenstacheln) lassen nach ihrem Vorkommen die †Acanthodi als wohl ausschließliche Bewohner von Binnengewässern der Landfesten ansprechen.

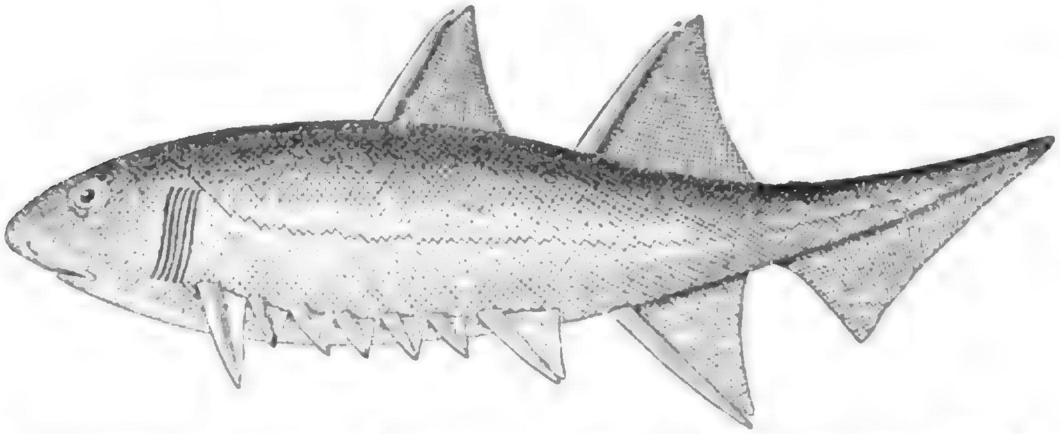


Fig. 20. †Climatius Macnicoli Powr. sp. Devon, Oldred; Schottland. Nach A. Sm. Woodward. Aus Abel.

Während früher die †Acanthodier gewöhnlich als Ganoiden klassifiziert wurden (man vergleiche die sehr ähnliche Beschuppung des devonischen †Palaeonisciden † Cheirolepis), werden sie heute, da ihnen ein Operkularapparat und die für Ganoiden normalen Kieferbelagknochen fehlen, trotz ihres abweichend struierten Schuppenkleides als Elasmobranchier gedeutet. Hier müssen sie aber als ein ganz besonderer Seitenzweig — aus einer noch unbekannten Wurzel — aufgefaßt werden, welcher weder den †Ichthyotomi des Paläozoikums, noch den Plagiostomi wirklich nahegestellt werden kann.

b) Ordnung: †Ichthyotomi, Cope (†Proselachii, Döderlein), Devon bis Perm. (Fig. 21, 22).

Zwei Typen paläozoischer Haie mit ± spindelförmigem Körper, mit langem, fast terminalem Maulspalt, mit heterozerk-epibatischem oder diphyzerkem Schwanz, mit wenig verkalktem Innenskelett, ohne

Digitized by Google

deutliche Gliederung der Wirbelsäule, zeichnen sich durch lappenförmige paarige Flossen aus, an deren langer, gegliederter Achse (Metapterygyum) die Flossenstrahlen ± deutlich archipterygial angeordnet sind. Die Beckenflosse der Männchen läuft in ein Pterygopodium (Begattungsstachel) aus. Flossenstacheln fehlen. Die zackigen Zähne, in Querbändern angeordnet, funktionieren und folgen einander in der dem Revolvergebiß echter Haie entsprechenden Weise.

Unterordnungen: †Cladoselachii, †Pleuracanthi.

1. Unterordnung: †Cladoselachii (Pleuropterygii) (Fig. 21).

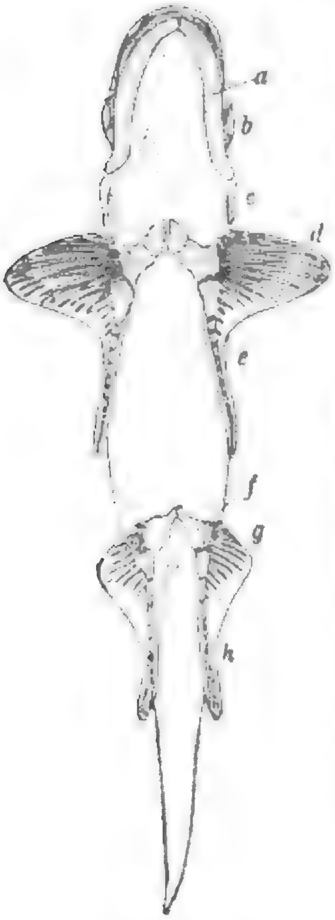


Fig. 21. †Cladoselache Fyleri Newb. Unterseite, Rekonstruktion von Jaekel, 1/8 natürliche Größe. a Mandibel, b Auge mit Sklerotikaring, c Kiemenbögen, d Brustflosse mit parallelen Strahlen und mit gegliederter langer Achse (e), f Becken, g Bauchflosse mit gegliederter langer Achse h (? Pterygopodium); die Seitenkiele am Schwanz sind nicht gezeichnet. Oberdevon, Clevelandshales; Ohio. Aus v. Stromer.

Aus dem marinen Oberdevon von Ohio (Cleveland Shales) sind zahlreiche Reste des etwa 60 bis 150 cm langen Haies †Cladoselache Dean bekannt, über dessen eigenartige Organisation besonders B. Dean in mehreren Publikationen berichtete. Der schlank spindelförmige Körper mit stumpfer Schnauze, mit weit vorn liegenden, von einem Sklerotikaring aus zahlreichen Plättchen umgebenen Augen läuft in eine kurze, hohe, hinten vertikal abgeschnittene Schwanzflosse aus, vor welcher eine Hautfalte rechts und links je einen Horizontalkiel am Schwanzflossenstiel bildet. Eine höhere vordere, eine niedrigere hintere Rückenflosse sind vorhanden. Die paarigen Flossen sind ± dreiseitig lappenförmig; die Afterflosse ist nicht nachgewiesen. Die Haut trägt kleine Placoidschüppchen.

B. Dean erkannte Spuren oberer verkalkter Bögen. Ein schlankes Hyomandibulare hinter dem Palatoquadratum spricht für Hyo- oder Amphistylie des Mandibularknorpels. Nach hinten an Größe etwas abnehmende Kiemenbögen sind erkennbar. Der Schultergürtel wird durch hohe breite (geteilte?) Knorpelspangen gebildet. In der breitlappig dreiseitigen, weder vorn noch hinten (?) vom Körper abgesetzten Brustflosse ist die Achse ein großes Metapterygium, welches nach hinten in eine längere Reihe von Knorpelsegmenten ausläuft. Vor dem Metapterygium stößt an den coracoidalen (?) Teil des Schulterbogens eine Anzahl kurzer Knorpelstrahlen (welche dem Meso- und Propterygium entsprechen). Die nahezu parallelen ungegliederten Strahlen der Flossen liegen vor und unter dem Metapterygium; an das zweite Segment der Achse sind nur noch wenige kurze Strahlen angegliedert. An die Beckenspange ist eine ganz analog gebaute, aber sehr wesentlich niedrigere Flosse gelenkt, in deren Basis noch Andeutungen eines propterygialen Knorpels erkennbar sind, und deren Achse (nur beim Männchen) in ein schlankes Pterygopodium ausläuft. Der Bau dieser Flossen läßt sie als ein uniseriales Archipterygium auffassen. Für B. Dean und andere wurde die Ausbildung der paarigen Flossen von †Cladoselache wichtig als Beweismittel für die Entstehung paariger Gliedmaßen aus Seitenfalten. In den unpaaren Rückenflossen sind den paarigen Flossen analoge, parallele Strahlen vorhanden. Die auffällig hohe, kurze Schwanzflosse ist — manchen Teleostiern ähnelnd — äußerlich homozerk, innerlich deutlichst heterozerk. Ueber dem steil aufwärts gebogenen Ende der Wirbelsäule stehen kurze breite Epuralia; das untere Schwanzsegel wird von langen Hypuralien durchzogen.

Die Zähne sind mehrspitzig; eine mittlere Spitze ist besonders hoch; auch die vordere und hintere können erheblichere Höhe erreichen.

Zahlreiche, meist nur auf isolierte Zähne, seltener auf Reste uniserial gebauter paariger Flossen gegründete Gattungen des Karbon und Perm Europas und Nordamerikas — aus marinen wie limnischen Ablagerungen — stehen wohl in allerengsten Beziehungen zu †Cladoselache, so †Cladodus Ag., †Symmorium Cope, †Phoebodus St. J. u. W., †Dicentrodus Traq., †Chondrenchelys Traq. (?).

2. Unterordnung: †Pleuracanthi (Ichthyotomi im engeren Sinne) (Fig. 22).

Digitized by Google

Nackthäutige — bis über $^1/_2$ m lange — Haie des Karbon und Perm, besonders aus Süß- und Brackwasserablagerungen, mit stumpfer Schnauze, fast terminalem Maulspalt, meist mit beweglichem, langem, mit Zähnchen besetztem Nackenstachel, mit langer Rückenflosse, die nur durch eine schwache Kerbung von der langen, diphyzerk-oxyzerken Schwanzflosse getrennt ist, erscheinen durch die deutlichere Archipterygiumform der paarigen Flossen — die gegliederte Achse ist wenigstens in der Brustflosse deutlich biserial von ± gegliederten Strahlen begleitet — durch stärkere Verkalkung des Innenskeletts höher spezialisiert als die †Cladoselachii.

Am Schädel inseriert das große Palatoquadratum zwischen der Postorbital- und der Epiotikalecke, hinter ihm ein schlankes Hyomandibulare, das mit Kiemenstrahlen besetzt ist. Fünf nach hinten kleiner werdende Kiemenbögen sind vorhanden. In der Wirbelsäule sind obere und untere Bögen mit Fortsätzen verkalkt. Der lange, fast vollständig einheitliche, unpaare Flossensaum wird von gegliederten, knorpeligen Trägern gestützt; deren je 2 auf ein Wirbelsäulensegment kommen. Der Schultergürtel erscheint gegliedert — rechts und links je dreiteilig —. Die vorderen Strahlen der lappigen — aber jetzt vom Körper deutlich abgesetzten — Brust- und Bauchflosse inserieren am Schultergürtel, resp. an dem nach hinten spatelförmig verbreiterten Beckenknorpel. Das Metapterygium der Beckenflossen läuft beim Männchen in ein Pterygopodium aus. Zwischen Becken und Schwanzflosse stehen 2 kurze, schlank lappenförmige Flossen (2 Anales oder Analis und 1 Caudalis ?), welche durch gegliederte Knorpelstrahlen gestützt werden, die sich an die hämalen Bogen der Wirbelsäule anfügen.

Die Zähne tragen auf dicker, breiter Basis 2 ± schlanke Spitzen, zwischen denen ein kleiner Mittelzacken sitzt.

An die bestbekannte Gattung †Pleuracanthus Ag. (Xenacanthus Beyr.) (Fig. 22) aus dem limnischen Oberkarbon und Unterperm von Frankreich, Deutschland, Böhmen, England, Texas sind eine Anzahl meist nur nach isolierten Zähnen bekannte Gattungen: †Diplodus Ag., †Dittodus, †Aganodus Ow., oder auf isolierte Stacheln begründete: †Orthacanthus Ag., †Compsacanthus Newb. u. a. m. anzuschließen.

B. Dean will genetische Beziehungen zwischen den †Cladoselachii und den †Acanthodi konstruieren; aber die letzteren sind in ihren meisten Organisationsdetails in einer Richtung spezialisiert, welche aus dem Bau von †Cladoselache z. B. nicht wohl abgeleitet werden kann.

c) Ordnung Plagiostomi Cuv. (Selachii ant.), vgl. Zool. Teil S. 1097.

Die Vorläufer der in den Meeren der Jetztzeit weit verbreiteten, formenreichen Haie und Rochen lassen sich mindestens seit den Zeiten des Unterkarbon nachweisen. Zwar kennen wir aus dem Devon, selbst aus dem Obersilur, Flossen- und Kopfstacheln, „Ichthyodorulithen" — wie sie Buckland nannte —, welche Haien und Haiverwandten angehört haben müssen; doch mit Ausnahme mancher wohl auf †Acanthodi zurückzuführender Stacheln (und der Vorkommnisse von †Cladoselache) lassen sich diese Reste, für die vielfältig verschiedene Namen im Gange sind, keinen bestimmten morphologischen Einheiten einordnen.

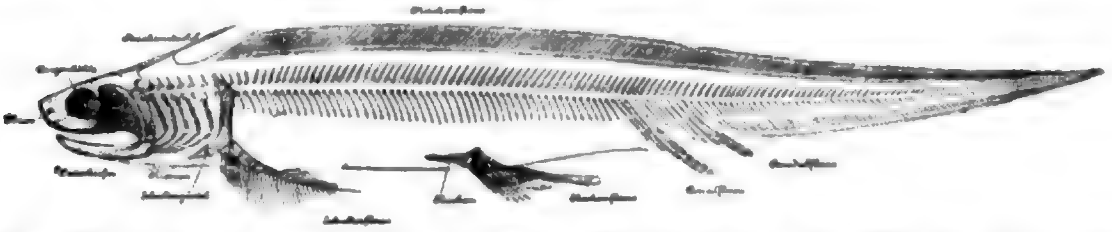


Fig. 22. †Pleuracanthus sessilis Jord. sp. Rekonstruktion des Skeletts nach Jaekel, $^1/_4$ natürliche Größe. Unterperm, Rotliegendes; Saarbrücken. Aus Jaekel.

Erst mit dem Vorkommen von Gebißresten im Unterkarbon werden Anhaltspunkte zu mehr oder weniger sicherem Vergleich mit den modernen Plagiostomen gewonnen, wennwohl auch damit noch keineswegs für alle Funde eindeutige Einreihung in die Familien und Unterordnungen der Haie ermöglicht wird; so bleiben z. B. die als †Cochliodontidae, †Psammodontidae, †Petalodontidae bezeichneten Formen nach ihren den lebenden Haien ganz fremd gegenüberstehenden Gebißtypen in ihrer systematisch-phyletischen Stellung durchaus unsicher.

Meistens sind nur isolierte Zähne oder Gebißteile fossil überliefert, dann Flossen- und Kopfstacheln, Placoidzähnchen der Haut, Koprolithen (Kotballen), seltener sind vollständigere Reste, welche u. a. über die verschieden weitgehende Verkalkung des Knorpelskeletts unterrichten. Besonders vollständige Körper sind aus dem oberen Lias (Posidonomyenschiefer) Württembergs, aus dem

Digitized by Google

oberen Malm (lithographische Schiefer) von Solnhofen in Bayern, Nusplingen in Württemberg, Cirin in Frankreich und aus dem Eozän des Mte. Bolca bekannt: †Hybodus, Squatina, Rhinobatis und wenige andere.

Die Scheidung der Plagiostomen in Selachioidei (Squaloidei, Haie) und Batoidei (Rochen), ursprünglich nach der Körperform, dann nach Ausbildung und Lage der Kiemenspalten vorgenommen, ist — abgesehen davon, daß eine ganze Menge fossiler Reste aus dem Karbon und Perm keiner dieser beiden „Unterordnungen" sicher einzureihen ist — keine streng natürliche. Dollo, Jaekel betonten, daß die Plagiostomen je nach der Lebensweise als nektonische Schwimmer die spindelförmige Gestalt der Haie, als Bodenfische die niedergedrückte, rhombischem Umriß zustrebende Rochenform annehmen, resp. ihre Körperform umändern.

Der von Hasse betonte Wert der verschiedenartigen Verkalkung der Wirbelsäule (diplo-, zyklo-, tecti-, asterospondyle Wirbel; vgl. Zoolog. Teil, S. 1064, Fig. 10) für die Systematik der Haie ist nicht ganz zu vernachlässigen. Aber natürliche Gruppen lassen sich auf Grund der Wirbelverkalkungen nicht begründen; so hat †Hybodus keine Verkalkungen von Wirbelkörpern, während die sonst ihm nächststehenden Cestracionidae asterospondyle, zum Teil zyklospondyle Wirbelkörper haben; die den echten Haien zugehörende Squatina hat ebenso wie die echten Rochen tectispondyle Wirbel. Gleiche Art der Wirbelverkalkung ist von verschiedenen Reihen der Plagiostomen erworben worden.

Da vollständigere Skelette, die u. a. auch über die Ausbildung des Kopfskeletts genügend orientieren, große Seltenheiten sind, ist eine wirklich natürliche Systematik der fossilen und lebenden Plagiostomen heute noch nicht möglich. Wir können im wesentlichen nur eine Anzahl nebeneinander stehender Gruppen unterscheiden.

1. Hauptgruppe: Selachioidei, Haie; vgl. Zool. Teil S. 1097.

a) Haie mit mehr als fünf Kiemenspalten.

1. Gruppe: Notidanoidei (Jura bis jetzt).

Von den hier vereinigten Haien sind Reste der Notidanidae, Notidanus Cuv. (Fig. 23) seit dem unteren Jura bekannt, welche in ihren Gebißformen (schief gezähnte Kammzähne im Unterkiefer, unregelmäßiger gezackte Zähne im Oberkiefer, je eine Reihe kleinerer symmetrischer Symphysenzähne oben und unten) den lebenden Heptanchus und Hexanchus mit 7 resp. 6 Kiemenspalten vollkommen entsprechen (s. Zool. Teil S. 1063, 1064. Fig. 7, 11). Chlamydoselachiidae, Chlamydoselachus Garm. mit 6 Kiemenspalten, kennt man erst seit dem Jungtertiär (Pliozän von Toskana).

Die Diplospondylie der Wirbelsäule, die Amphistylie des Schädels (bei Heptanchus zur Autostylie, bei Chlamydoselachus mehr zur reinen Hyostylie hinneigend), die fast terminale Lage des Maulspaltes wird neben der Zahl der Kiemenspalten als Beweis für die Altertümlichkeit dieser Formen angesehen, unter welchen Chlamydoselachus

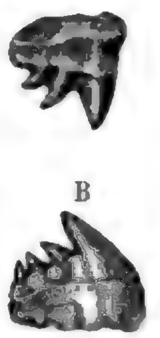


Fig. 23. Notidanus †eximius Wagn. A oberer Seitenzahn von innen, B unterer Seitenzahn von außen. Oberster Malm, Jura; Schnaitheim, Württemberg. Aus v. Stromer.

wegen der schlanken Aalgestalt und der schlanken heterozerk-oxyzerken Schwanzflosse die Endform einer langen Entwickelungsreihe darstellt (Dollo). Vielleicht besteht zwischen den paläozoischen †Cladoselachiidae und den Notidanoidei, besonders Chlamydoselachus, verwandtschaftliche Beziehung. Allerdings fehlt es an Hinweisen auf Zwischenformen im Gebiß zwischen †Cladoselachiern und Notidanus, während die schmelzlosen dreispitzigen Zähne von †Cladoselache den mit Schmelz überzogenen von Chlamydoselachus morphologisch erheblich näher stehen. Den Weg zur Umformung der Brustflosse, des „Pleuropterygiums" oder richtiger des uniserialen Archipterygiums, der †Cladoselachii in das normale Hai-Ichthyopterygium der Notidanoidei wird durch die Brustflosse des karbonischen Cladoselachiers †Symmorium Cope gezeigt: Verschmelzung der Segmente des Metapterygium und Verwachsung der vorderen proximalen Knorpelstrahlen zum Meso- und Propterygium.

b) Haie mit fünf oder weniger als fünf seitlichen Kiemenspalten.

2. Gruppe: Squaloidei; vgl. Zool. Teil S. 1098.

1. Untergruppe: Heterodonti. Familien: †Hybodontidae (Karbon bis Kreide); Cestracionidae (Karbon?, Trias bis jetzt); ?†Edestidae (Karbon, Perm) (Fig. 24—29).

Mit dem lebenden Cestracion Cuv. läßt sich eine erhebliche Anzahl fossiler, heterozerker Haie in morphologische Verbindung bringen, die kein oder nur ein kurzes, massives Rostrum besitzen, deren Schädel amphi- bis hyostyl ist, welche wie Cestracion, wenn auch nicht immer in gleich scharfem Gegensatz, in der Symphysenregion anders gestaltete Zähne besitzen als in dem ± vielreihigen, locker bis dicht gefügten

Digitized by Google

Pflaster von ursprünglich höckerigen Zähnen auf dem Mandibular- und Palatoquadratknorpel, deren Wirbelsäule unverkalkte bis zyklo- und asterospondyle Wirbelkörper besaß, und deren 2 Rückenflossen durch kräftige, verschieden verzierte und bewehrte Flossenstacheln gestützt sind.

†Hybodontidae. Schon im Unterkarbon kommen quer verlängerte, wie Bergrücken modellierte Zähne vor, †Orodus Ag. und andere, die wohl zu im allgemeinen ähnlichen Pflastern auf den Kiefern vereinigt waren wie bei Cestracion. Reihen ± schlankhügelförmiger Zähne mit fein gerilltem Schmelz und mit zarter Längskante von Schmelz kennzeichnen die Gattung †Acrodus Ag., (Fig. 24) (Muschelkalk bis Kreide) ohne verkalkte Wirbelzentra. Durch mehrere vollständigere Exemplare aus den Posidonomyenschiefern des Oberlias Württembergs und aus den lithographischen Schiefern des oberen Malm Bayerns ist neben sehr zahlreichen Funden von Zähnen und Flossenstacheln †Hybodus Ag. (Fig. 25, 26) (Muschelkalk bis Unterkreide) bekannt: bis 1,5 m lange, plump spindelförmige Haie mit langer, heterozerker Caudalis und weit hinten liegender kleiner Analis; in der Wirbelsäule sind nur obere und untere Bögen und vorn auch Rippen verkalkt; das Kopfskelett ist deutlich amphistyl mit grobem Hyomandibulare, mit groben, hakenförmigen Kopfstacheln („Sphenonchus") der Männchen, mit Zähnen, deren ± schlanke Basis eine höhere, stumpfe Mittelzacke und mehrere niedrigere Seitenzacken trägt.[1]) Aehnliche Gebißform hat †Synechodus A. Sm. Woodw. (Kreide), aber die Zähne sind komprimierter, länger, und die Wirbelsäule ist asterospondyl. Dicke, grobe, oben flach vierseitige Zähne mit feinrunzeliger Krone bildeten auf den Kiefern von †Strophodus Ag.

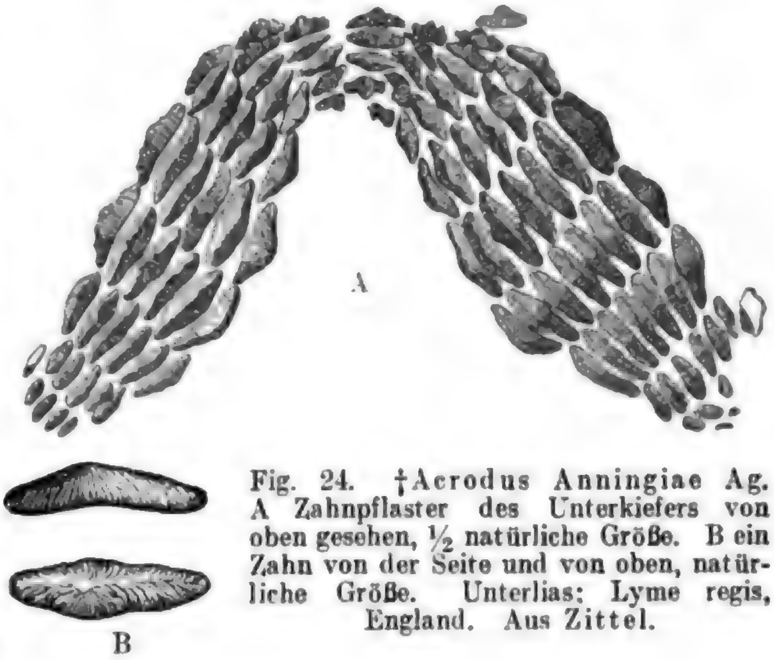


Fig. 24. †Acrodus Anningiae Ag. A Zahnpflaster des Unterkiefers von oben gesehen, ½ natürliche Größe. B ein Zahn von der Seite und von oben, natürliche Größe. Unterlias: Lyme regis, England. Aus Zittel.

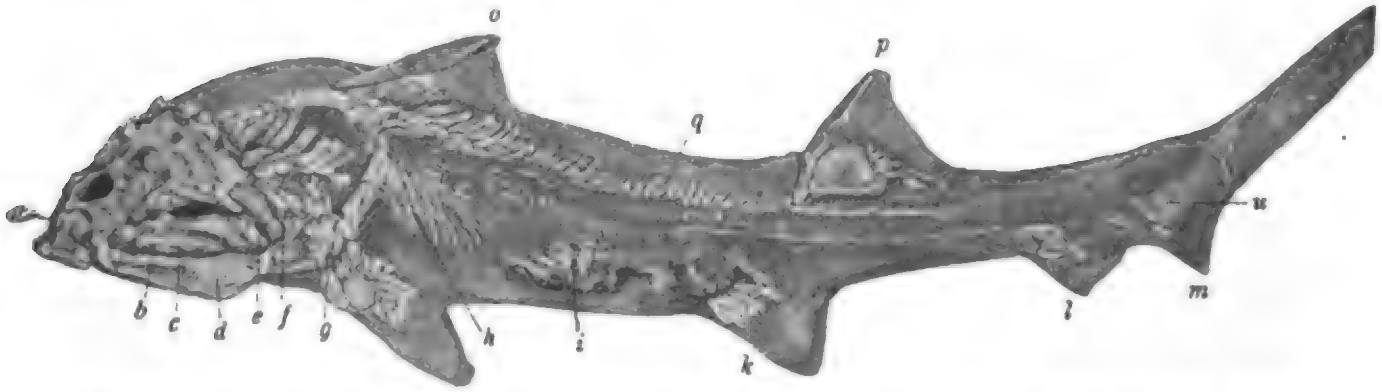


Fig. 25. †Hybodus Hauffi E. Fraas. Skelett mit Abdruck des Körperumrisses und mit Resten von Weichteilen, Schädel etwas schräg gesehen, $^1/_8$ natürliche Größe. a kurzes Rostrum, dahinter präfrontale Lücke, b Labialknorpel, c Palatoquadratum mit kurzem prä- und postorbitalem Fortsatz, d Unterkiefer, e Hyomandibulare, f Kiemenbögen, g Brustgürtel mit basalen und radialen Knospen der Brustflosse, h Rippen, i Magenregion mit Beuteresten, k Bauchflosse, l Afterflosse, m unteres Segel der Schwanzflosse, o erste, p zweite Rückenflosse mit Flossenstachel, Knorpelplatte und Knorpelstrahlen, q obere, u untere Bögen der Wirbelsäule. Oberer Lias, Posidonomyenschiefer; Holzmaden, Württemberg (Tübinger Museum). Nach Koken. Aus v. Stromer.

[1]) Eines der Exemplare von †Hybodus Hauffi E. Fraas aus dem Posidonomyenschiefer Württembergs läßt seine Todesursache erkennen: es hat ca. 250 Belemniten gefressen, deren fingerlange Kalkrostren wohlgepackt in der Magenregion liegen (Naturalienkabinet Stuttgart).

Digitized by Google

(Fig. 27) ein grobes Pflaster (Jura, Unterkreide); sehr große, mit groben Perlen besetzte Flossenstacheln (†Asteracanthus Ag.) ge-

Fig. 26. †Hybodus carinatus Ag. Stachel einer Rückenflosse, ²/₃ natürliche Größe. b im Fleisch steckender Basalteil, p Rinne der Hinterseite für den Vorderrand des Flossenknorpels, z Zähnchen am freien Hinterrande. Unterer Lias; Lyme regis, England. Aus v. Stromer.

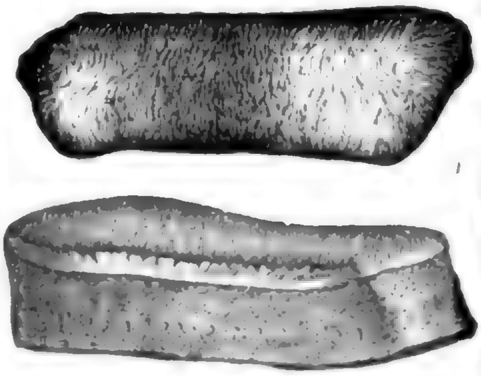


Fig. 27. †Strophodus reticulatus Ag. Zahn von oben und von der Seite; natürliche Größe. Kimeridge: Tonnere, Yonne, Frankreich. Aus Zittel.

hören dazu. Die aus dem deutschen Kupferschiefer als †Wodnika Mstr. bezeichneten Haireste (Flossenstacheln, leicht gewölbte Pflasterzähne, Flossen- und Hautreste) gehören ebenfalls zu den †Hybodonten.

Cestracionidae sind mindestens seit der Trias bekannt: †Palaeobates H. v. M. (Muschelkalk) mit flachgewölbten Dentinzahnkronen. †Palaeospinax Egert (Lias) mit schlankspitzigen Symphysenzähnen hat zyklo- bis asterospondyle Wirbelkörper. Dem lebenden Cestracion Cuv. (Kreide bis jetzt) mit asterospondylen Wirbelkörpern steht aus dem oberen Jura besonders nahe †Paracestracion Kok. mit Symphysenzähnen ohne Nebenzacken. — Im marinen Unterkarbon Nordamerikas sind eigentümliche Gebißformen gefunden worden, †Campodus de Kon. (Fig. 28), welche durch das Zahnpflaster der Mandibelflächen lebhaft an Cestracion gemahnen, aber in der Symphyse eine spiralgestellte Reihe sehr grober, winkelig gebogener Zähne mit kräftig vortretender Mittelspitze besitzen. Die Deutung dieser eigenartigen Symphysenzähne als Waffe liegt zunächst, Abel sieht aber in ihnen ein Hilfsmittel zum Losreißen von hartschaliger Beute, Muscheln usw., die nach dem Zahnpflaster der Kiefer (Reibgebiß) dem Tiere als Nahrung diente.

†Edestidae. Unter diesem Namen werden höchst eigenartige Gebilde zusammengefaßt, die aus marinen und limnischen Ablagerungen des Oberkarbon und Perm Nordamerikas, Europas, Westaustraliens bekannt geworden sind: bilateral symmetrische, dreieckige, an den Rändern gekerbte, schmelzbedeckte Zähne oder Stacheln mit ± großen, aus Vasodentin gebauten Wurzeln, zum Teil mit verkalktem Knorpel.

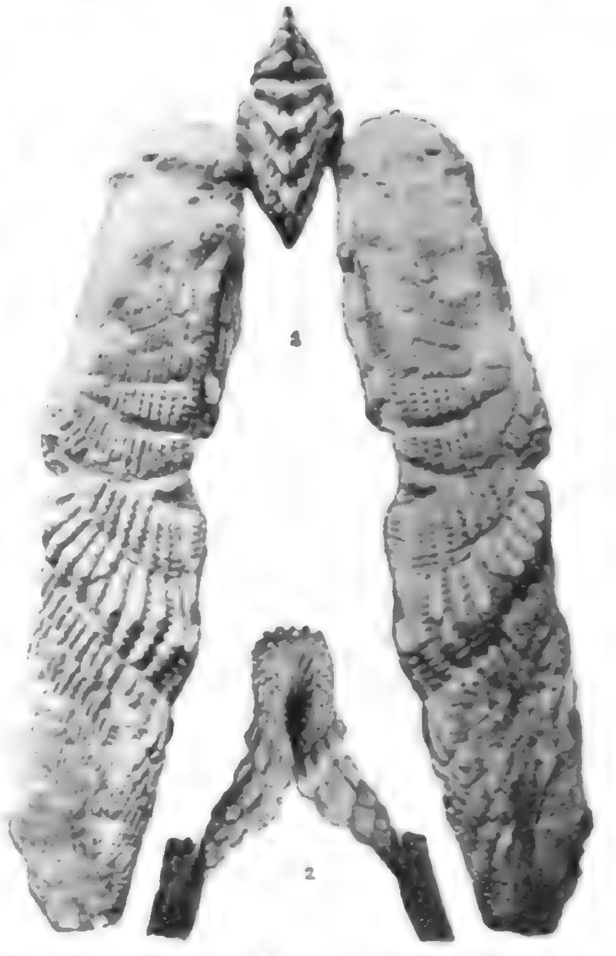


Fig. 28. †Campodus variabilis Newb. a. Worth. sp. Kombination einer symphysealen Zahnspirale von Cedar Creek (Nebraska) mit Unterkieferästen von Topeka (Kansas). Nach Eastman, ca. ¹/₄ natürliche Größe. 2. Cestracion Francisci Gir. Unterkiefer, verkleinert, rezent; Pazifischer Ozean. Nach Eastman. Aus Zittel.

Die Wurzeln sind ± eng miteinander verwachsen, wodurch bogenförmig (†Edestus Leidy Fig. 29, †Toxoprion Hay) bis in loser Spirale — wie ein †Crioceras (Ammonit) eingerollte Körper (†Helicoprion Karp., Fig. 29, †Lissoprion Hay) entstehen. Die Dinge müssen der Symmetrieebene des Tieres angehört haben. Karpinsky, Eastman, Jaekel deuteten sie als reihenförmig angeordnete, nicht ausfallende Symphysenzähne des Ober- oder Unterkiefers; Leidy, B. Dean, P. Hay u. a. sehen hierin Stacheln, welche vor oder statt einer Rückenflosse aus-

Digitized by Google

gebildet und bei †Helicoprion z. B. seitlich neben die Flosse gedrängt sein sollten. Die metamere Ausbildung dieser Zahngruppen läßt die Deutung als vorgeschobene Medianreihe von Symphysenzähnen, welche als Waffe dienten, durchaus zu. Der Anschluß der †Edestiden an die Heterodonti ist noch unsicher.

2. Untergruppe: Spinacidi. Familien: Spinacidae (Kreide bis jetzt), Pristiophoridae (Kreide?, Jungtertiär bis jetzt). Die heute lebenden Gattungen der Spinacidae sind bis zur Oberkreide zurückzuverfolgen (Centrophorus M. u. H., Acanthias Bonap.), und von den den Pristidae unter den Rochen konvergenten Pristiophoridae, mit langem, an den Seitenrändern mit verschieden großen Hautzähnen bewehrtem Rostrum, ist Pristiophorus selbst in der Oberkreide des Libanon (?) resp. seit dem Jungtertiär bekannt.

3. Untergruppe: Rhinae. Familie Squatinidae (Rhinidae) (Oberjura bis jetzt), vgl. Zool. Teil S. 1093.

Haie von Rochenform, auch mit tektispondylen Wirbeln, aber ohne Rostrum, mit spitzkegelförmigen Zähnen, mit großen Brustflossen, die vorn nicht mit dem Kopf verwachsen sind, so daß die Kiemenspalten zum Teil noch seitlich austreten, kommen im Oberjura (im lithographischen Schiefer von Bayern, Württemberg und von Cirin in Frankreich), in der Oberkreide Westfalens und des Libanon in ausgezeichneten Skeletten vor, die sich in nichts wesentlichem von der lebenden Squatina Aldov. (Rhina Kl.), (Fig. 30) unterscheiden.

3. Gruppe: Galeoidei; vgl. Zool. Teil S. 1098.

Familien: Scylliidae (Oberjura bis jetzt), Lamnidae (Mitteljura bis jetzt), Carchariidae (Kreide bis jetzt), Rhinodontidae (Tertiär bis jetzt).

Spindelförmige Haie mit dreiteiligem Rostralknorpel, mit hyostylem Kopfskelett, asterospondylen Wirbelkörpern, mit scharfschneidenden ± dreieckigen bis schlank klingenförmigen Zähnen auf verschieden gestalteter meist zweiteiliger Wurzel — die Mehrzahl der lebenden echten Haie umfassend — lassen sich in einzelnen Gattungen der Lamnidae (†Orthacodus Ag.) und Scylliidae (†Palaeoscyllium Wagn. und Pristiurus Bonap.) bis in den Mittel- resp. Oberjura zurückverfolgen. Die meist isoliert gefundenen Zähne sind die häufigsten Hai-

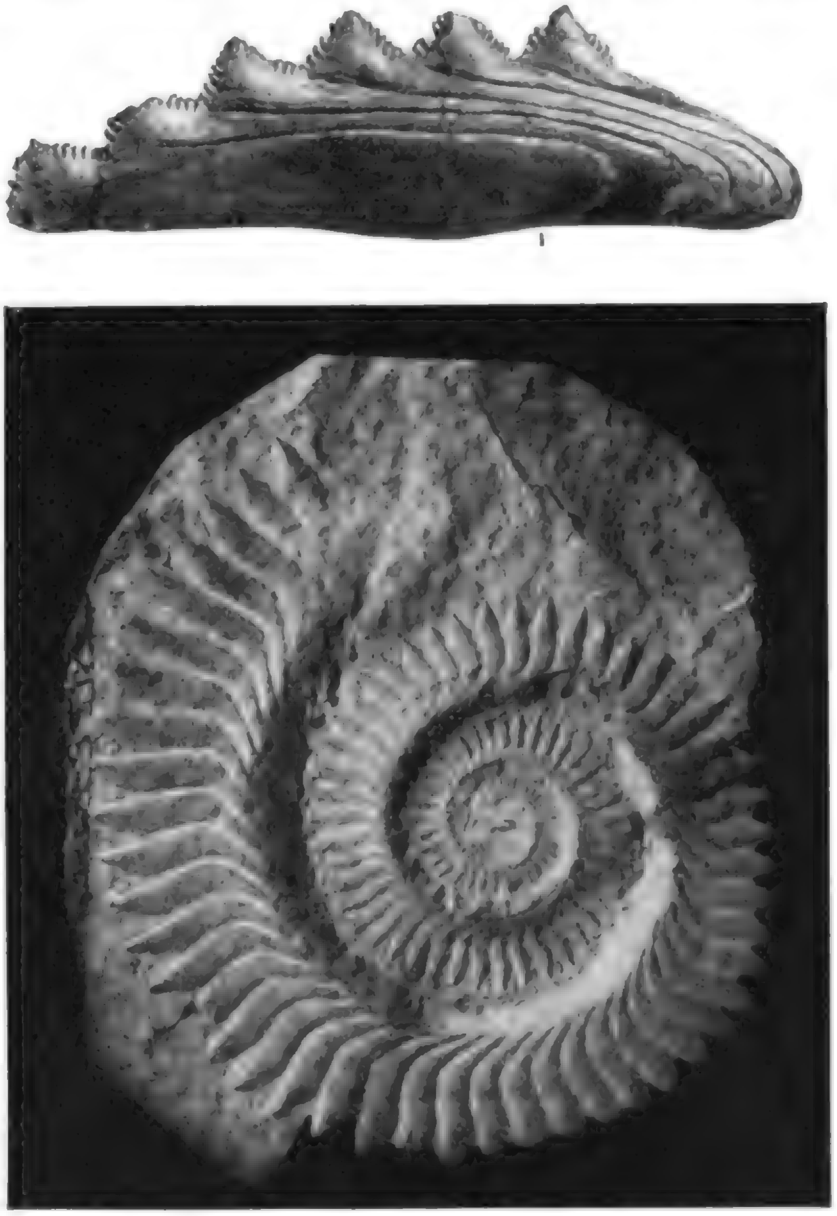


Fig. 29 oben: †Edestus crenulatus Hay. Mediane Zähne oder Stacheln, $^2/_3$ natürliche Größe. Oberkarbon; Illinois U. S. A. Nach Hay. Aus Zittel.

Fig. 29 unten: †Helicoprion Bessonowi Karp. „Spiralorgan", ½ natürliche Größe. Unterperm, Artinskstufe; Krasnoufimsk, Gouv. Perm. Nach Karpinsky. Aus Zittel.

Digitized by Google

reste der Kreide und des Tertiär, von denen manche auf riesige Formen schließen lassen: †Oxyrhina Mantelli Ag. (Oberkreide), Carcharodon megalodon Ag. (Tertiär), dessen Zähne bis 15 cm hoch sind. Verhältnismäßig nur wenige Gattungen sind ausgestorben.

Wie, auf welchem Wege und wann etwa aus den geologisch älteren Squaloidei die Formen der Galeoidei abgezweigt sein mögen — darüber gibt das fossile Material keinerlei sichere Auskunft und ebensowenig darüber, wie etwa die Squaloiden von anderen Elasmobranchiern abzuleiten seien, möglicherweise von den †Cladoselachii (†Ichthyotomi), welche zeitlich (und auch morphologisch?) allein für die Verbindung mit anderen Typen in Betracht kommen könnten.

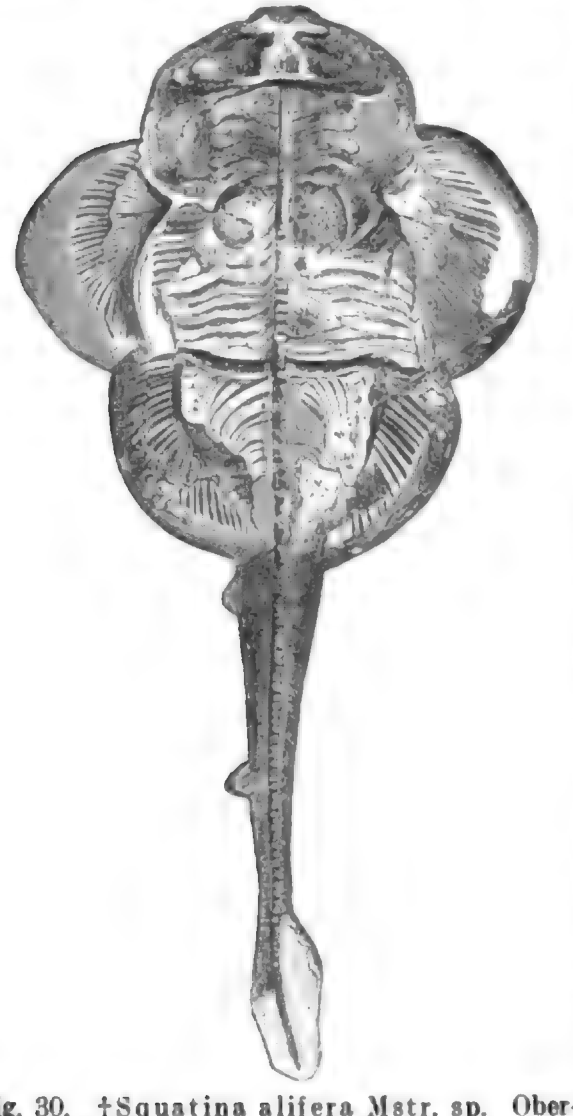


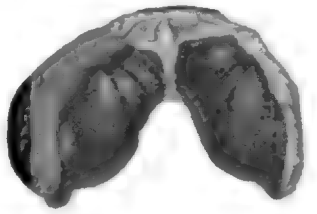
Fig. 30. †Squatina alifera Mstr. sp. Oberjura, lithographischer Schiefer; Eichstätt, Bayern. Aus Zittel.

Formengruppen unsicherer systematischer Stellung: †Cochliodontidae, †Psammodontidae, †Petalodontidae.

Aus dem Karbon und Perm sind Reibgebisse, Kopfstacheln, seltener Reste der Körperformen von Plagiostomen bekannt, deren Einordnung in die übrigen Haigruppen größten Schwierigkeiten begegnet. Die Gebisse deuten auf konchifrage, benthonische Fische, die in wenigen Fällen beobachtete rochenähnliche Körperform spricht in gleichem Sinne.

Als †Cochliodontidae werden Gebißformen bezeichnet, welche aus wenigen, ± gewölbten, gewöhnlich von wenigen Querfalten überzogenen, unten hohlen Zähnen aus Vasodentin bestehen. Jederseits sitzt im Kiefer ein größerer Hauptzahn, vor ihm 2 bis mehrere kleinere Zähne. Zahnersatz kann nicht stattgefunden haben. †Cochliodus Ag. (Fig. 31) (Unterkarbon), †Psephodus Ag. (Unterkarbon), †Streblodus Ag. u. a. m. — Nach Owen und A. Sm. Woodward sind solche Zähne durch Konkreszenz benachbarter und aufeinander folgender Zähne cestracionartiger Gebisse entstanden; dann könnten die †Cochliodonten als Verwandte der Heterodonti gedeutet werden. — Jaekel faßt die †Cochliodonten mit verschiedenartig ausgebildeten, seitlichen Kopfstacheln als †Trachyacanthidae zusammen. Diesen rechnet er auch den ganz eigenartigen kleinen Fisch †Menaspis armata Ew. (Fig. 32) aus dem Kupferschiefer zu: Eine Form von rochenförmigem Habitus mit hohlen, groben, vorderen Seitenstacheln am Kopf, mit 3 Paaren gebogener, langer dorsaler Kopfstacheln, mit Längsreihen dorniger Stacheln und grober Placoidschuppen auf dem ganzen Körper, mit flachen, dreiseitigen Reibzähnen im Maul. Jaekel bringt seine †Trachyacanthidae mit den Holocephalen in Verbindung, denen sie durch das Fehlen des Zahnwechels ja in der Tat ähneln.

Fig. 31. †Cochliodus contortus Ag. Unsymmetrisch gewölbte Zahnplatten in natürlicher Lage, $^1/_4$ natürlicher Größe. Marines Unterkarbon; Armagh, Irland. Aus v. Stromer.



†Psammodontidae (Unterkarbon). Flache, ± vierseitige Zähne aus Vasodentin mit punktierter oder fein gerunzelter Oberfläche sind in einer bis mehreren Reihen zu einem Reibzahnpflaster zusammengefügt, welches dem Gebiß der Myliobatidae unter den Rochen ähnlich zu deuten ist. †Psammodus Ag., †Copodus Dav., †Archaeobatis Newb. Letzterer Typ muß nach einem Gebiß von †Archaeobatis gigas Newb. mit Zähnen von 10 × 15 cm Riesengröße erreicht haben.

Digitized by Google

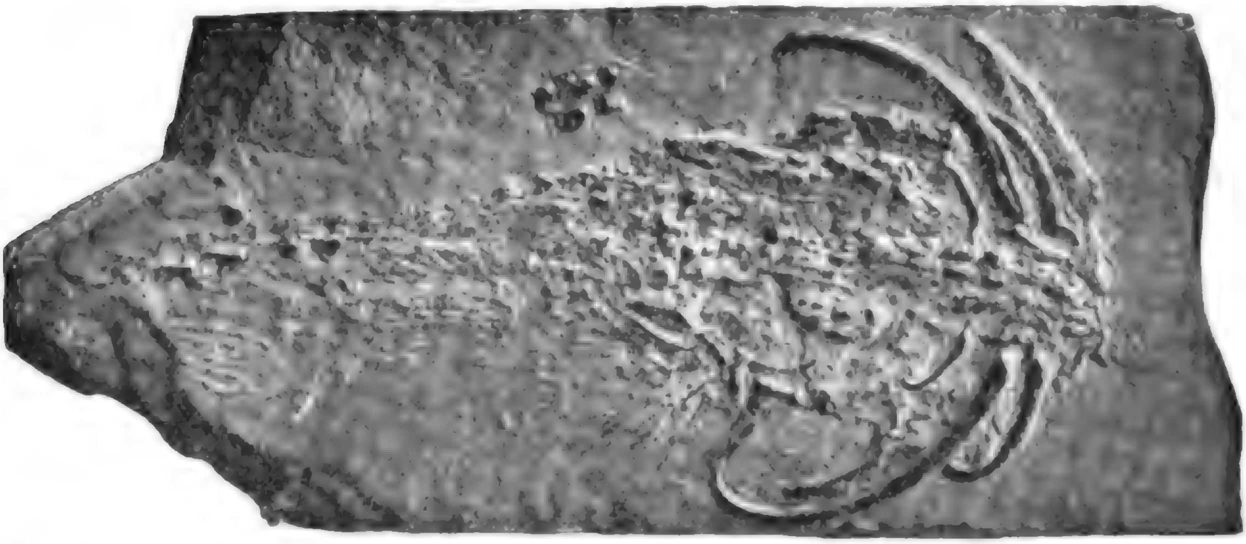


Fig. 32. †Menaspis armata Ew. Oberperm, Zechstein, Kupferschiefer: Martinsschacht, Thüringen. $^2/_3$ natürlicher Größe. Aus Jaekel.

†Petalodontidae (Unterkarbon bis Perm). Die in mehreren Längs- und Querreihen angeordneten, verschieden gebogenen Zähne tragen auf einer ± hohen Wurzel eine meist scharf abgeschnürte, quergestellte Krone aus Vasodentin mit Schmelzmantel; Ausstoßen von Zähnen findet nicht statt.

†Petalodus Ow. (Karbon), †Polyrhizodus M'Coy mit vielfach gespaltener Wurzel (Karbon), †Pristodus Dav. u. a. m. Von † Janassa Mstr. (Fig. 33) aus dem permischen Kupferschiefer Deutschlands ist die Körperform ziemlich gut bekannt: sie gleicht durch die großen, vorn vom Kopf scharf abgesetzten Brustflossen der Gestalt einer Squatina. In dem Gebiß aus 5 bis 7 Längs- und etwa 10 Querreihen von S-förmig gebogenen Zähnen mit quergeriefter Oberfläche legt sich jeder neu in Funktion tretende Zahn von hinten her auf die älteren seiner Reihe, welche nicht ausfallen.

Alle diese Formen mögen in näheren oder ferneren Beziehungen zu den Heterodonti stehen; sicheres über ihre Zusammengehörigkeit, ihre Herkunft und ihre etwaigen Beziehungen zu späteren Rochenformen oder auch zu den Holocephalen läßt sich jedoch nicht aussagen.

2. Hauptgruppe: Batoidei, Rochen; s. Zool. Teil S. 1098.

Außer einer systematisch ganz unsicheren Rochenform (?) †Tamiobatis vetustus Eastm. aus dem Oberdevon von Kentucky, außer den rochenförmigen Plagiostomen des jüngeren Paläozoikum (†Janassa, †Menaspis usw.) und den sich engstens an die Squaloidei anschließenden Squatinidae ist der echte Rochentyp (mit ventralen Kiemenspalten, mit ausgeprägtester Hyostylie des Kieferapparates, mit flachgedrücktem Körper, mit fast immer tektispondylen Wirbeln) seit dem Jura in mindestens zwei größeren Formenkreisen entfaltet.

1. Gruppe: Rhinoraji Jaekel, (Pachyura, Gill).

Die großen Brustflossen stoßen nur seitlich an das ± große Rostrum; das Zahnpflaster besteht aus meist kleinen, höckerigen bis spitzigen Zähnen aus Pulpodentin mit zweiteiliger Wurzel; der Schwanz mit 2 Rückenflossen und lappiger, heterozerker Schwanzflosse (auch mit Seitenkielen) ist meist nicht scharf vom Rumpf abgesetzt. Familien: Rhinobatidae, Pristidae, Rajidae.

Von den Rhinobatidae ist Rhinobatis Bloch (Spathobatis Thioll.) (Fig. 34) mit langem, ± spitzigem Rostrum seit dem oberen Jura bekannt; prachtvolle, die ganze Form wiedergebende Skelette mit Hautresten und Flossen wurden in Ablagerungen der lithographischen Schiefer gefunden, ebenso in der oberen Kreide des Libanon und im Eozän des Mte. Bolca. †Belemnobatis Thioll. mit kurz gerundetem Rostrum, mit Flossenstacheln an den beiden, dem Schwanz aufsitzenden Dorsales ist aus dem lithographischen Schiefer von Cirin (Frankreich) bekannt. Trigonorhina und Rhynchobatus M. u. H. kennt man seit dem Tertiär.

Die aus der oberen Kreide (†Sclerorhynchus atavus A. Sm. Woodw., Fig. 35, Libanon) und seit dem Tertiär (†Propristis Dam., Pristis Lath.) bekannten Pristidae, die Sägefische mit langem Rostrum, dessen Seiten mit in Alveolen steckenden Placoidzähnen bewehrt sind, mit schlankem haiförmigem Körper sind höchstwahrscheinlich ein an nektonisches Leben angepaßter Seitenzweig der Rhinobatidae.

Digitized by Google

Rajidae sind mit Raja Cuv. fossil seit der oberen Kreide (Libanon) bekannt; dort kommt mit Raja †expansa Dav. die torpedoähnlich geformte Gattung †Cyclobatis Egert. vor.

Untergruppe: Narcobati; vgl. Zool. Teil S. 1098. Familie Torpedinidae.

Die Torpedinidae mit reduziertem Rostrum (vgl. Narcine Henl.), vermutlich von den Rhinoraji direkt abzuleiten, sind durch Torpedo (Narcobates) †gigantea seit dem Eozän (Mte. Bolca) bekannt.

2. Gruppe: Centrobati, Jaekel (Masticura, Gill; Dasybatoidei); vgl. Zool. Teil, S. 1099.

Die Brustflossen wachsen vor dem Kopf zusammen; der Schwanz ist von der rhombischen Rumpfscheibe meist scharf abgesetzt, peitschenförmig, er unterliegt der Reduktion (Pteroplatea); die Zähne aus Vasodentin

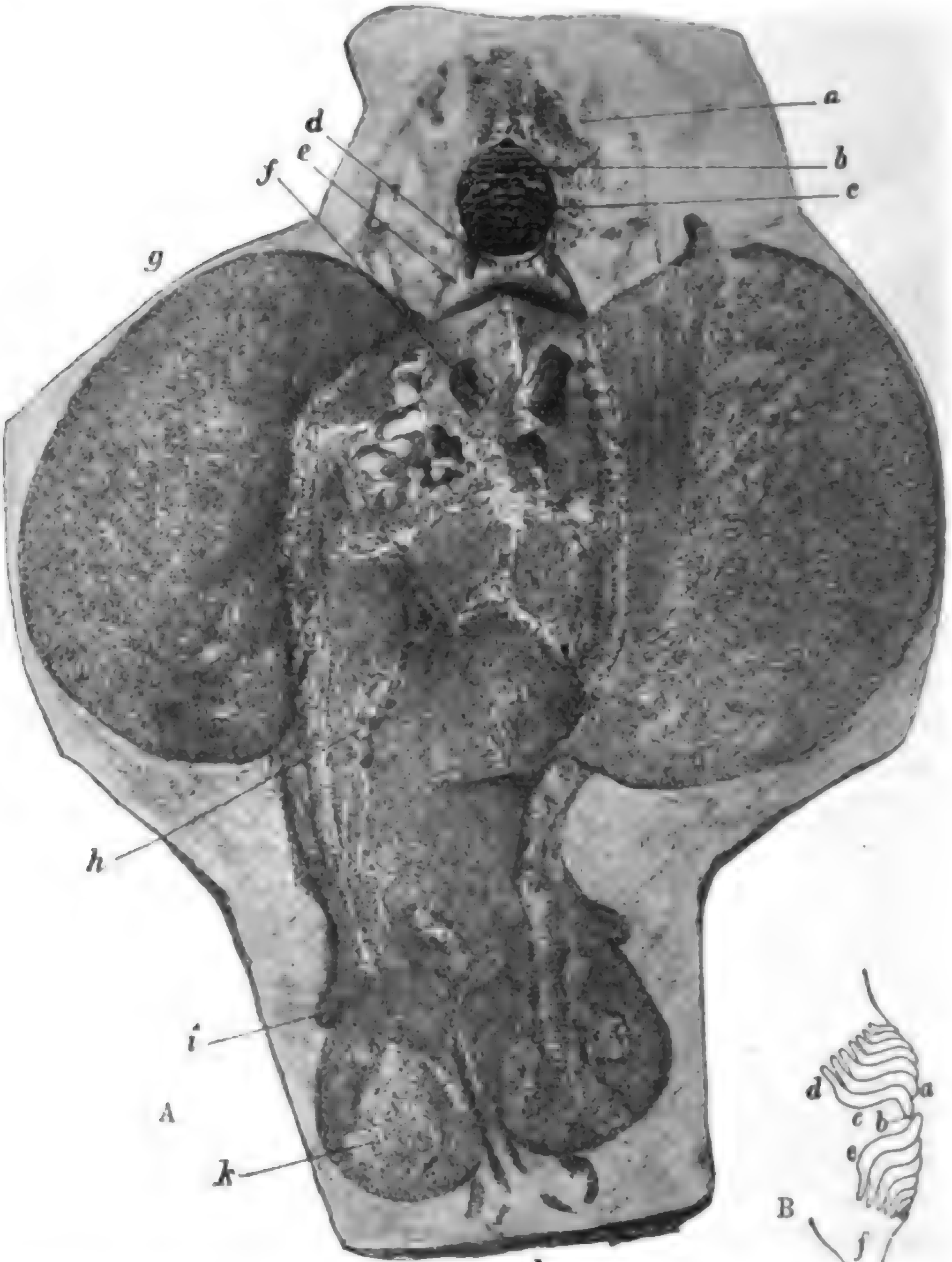


Fig. 33. †Janassa bituminosa Schloth. A Bauchseite, $^1/_3$ natürliche Größe. a undeutlich begrenzte Kopfregion, b und c obere und untere Hälfte des Gebisses, d ? Lippenknorpel, e Unterkiefer, f Reste des Schultergürtels, g Brustflosse, h Darminhalt?, i „Lauffinger", vorderer abgegliederter Strahl der Bauchflosse k, l Schwanzrest. B Längsschnitt durch das Gebiß. a Aussenseite der Zähne, b „Schneide", c quergestreifte Oberseite, d Wurzel des jüngsten Oberkieferzahnes, e jüngster Unterkieferzahn, f Unterkiefer. Aus v. Stromer, z. T. nach Jaekel.

Digitized by Google

bilden ein meist enggefügtes Reibpflaster. Familien: Trygonidae, †Ptychodontidae, Myliobatidae.

Von den Trygonidae (mit zweiwurzeligen

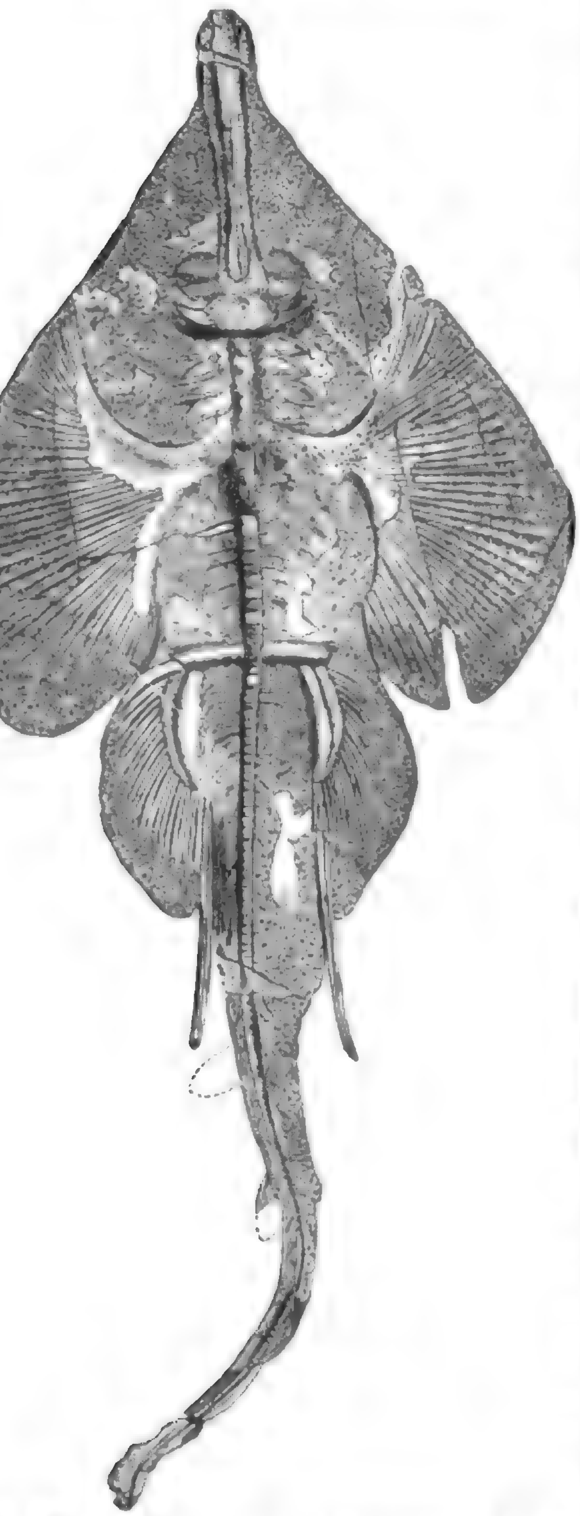


Fig. 34. Rhinobatis †mirabilis Wagn. (†bugesiacus Thioll.) ♂ ca. 1/10 natürlicher Größe. Oberster Jura, lithographischer Schiefer; Eichstätt, Bayern. Aus Zittel.

Zähnen) sind einzelne Reste seit der Kreide bekannt. Trygon Adans. selbst wurde in schönen Exemplaren im Eozän des Mte. Bolca, in einzelnen Zähnen und Hautschildern öfters im jüngeren Tertiär gefunden.

†Ptychodontidae. Aus der jüngeren Kreide sind ± hochbuckelige, quergeriefte und gerunzelte Zähne mit vierseitiger Wurzel bekannt — †Ptychodus Ag. (Fig. 36) †Hemiptychodus Jaek. —, welche in mehreren Reihen ein grobes Zahnpflaster auf dem vorderen Teile der Kiefer bilden; Reste der Wirbelsäule zeigen zyklospondylen Bau.

Die verschiedenen Gattungen der Myliobatidae mit ihren zum Teil riesigen Formen, mit massivem, verschiedenartig zusammengesetztem Pflaster aus flachen sechs- bis fünfseitigen Zähnen sind seit dem Eocän bekannt.

Aus der Körperform, aus der mehr randlichen bis mehr medianen Lage der Augen ergeben sich die verschiedenen Rochentypen als Fische, welche mehr oder weniger weit an benthonisches Leben angepaßt sind, oder zu nektonischer Lebensweise zurückkehren; letzteres zeigen mehr oder weniger deutlich die Pristidae und die Myliobatiden Ceratoptera und Cephaloptera (L. Dollo).

Ueber die Herkunft der Rochen herrscht Ungewißheit. Die Centrobatidae mögen mit den Heterodonti — etwa †Strophodus unter den †Hybodontidae verwandt sein, wenigstens hat das Zahnpflaster dieser Haie gewisse Aehnlichkeit mit dem der Centrobatiden. Ob die Rhinoraji aus gleicher Wurzel entstammen, ist völlig ungewiß.

d) Ordnung: Holocephali. Lias bis jetzt; s. Zool. Teil, S. 1099.

Nachdem die ganz unvollkommen bekannten †Ptyctodontidae des Devon auf Grund des Halspanzers von †Rhamphodus von L. Dollo den †Arthrodira (s. S. 1117) zugerechnet werden, lassen sich die ältesten, den Holocephalen ohne Bedenken einzureihenden, fossilen Reste erst aus dem unteren Lias feststellen. Unter den im ganzen nicht häufigen Funden wiegen Zähne vor, die sich nach ihrer Form, nach der Ausbildung und Zahl der Reibflächen unterscheiden lassen. Selten sind vollständigere Funde, welche über den Gesamthabitus der fossilen Formen orientieren. Einigemale wurden auch fossile Eikapseln von Holocephalen gefunden. Beachtenswert erscheint es, daß bei manchen mesozoischen Resten Placoidschuppen der Haut in größerer Zahl nachweisbar waren, als sie bei heute lebenden Formen vorkommen. Dann ist ferner die Verschmelzung der vorderen Teile der Wirbelsäule weniger weit vorgeschritten; Beckengürtel und Bauchflossen erscheinen bei den fossilen weniger modifiziert.

Mit die älteste Form †Squaloraja Ril. (Fig. 37) aus dem unteren Lias von England kam in der äußeren Form, durch besonders vorgezogene Rostralregion (mit dreigegabeltem Rostralknorpel) den heute in atlantischen und nordpazifischen Gewässern lebenden Harriottia Goode u. Bean nahe,

Digitized by Google

aber auf der Stirn saß ein langer, innen hohler Stachel (aus verkalktem Faserknorpel); vor der Rückenflosse fehlte der Stachel.

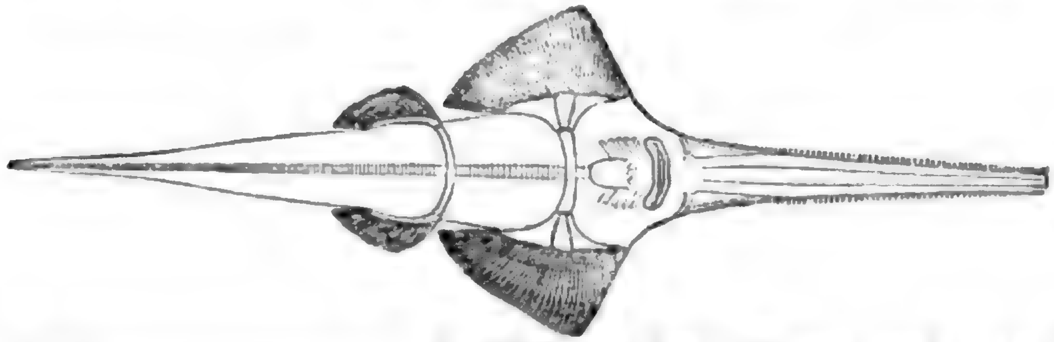


Fig. 35. †Sclerorhynchus atavus A. Sm. W. Obere Kreide; Libanon. Nach A. Sm. Woodward. Aus Abel.

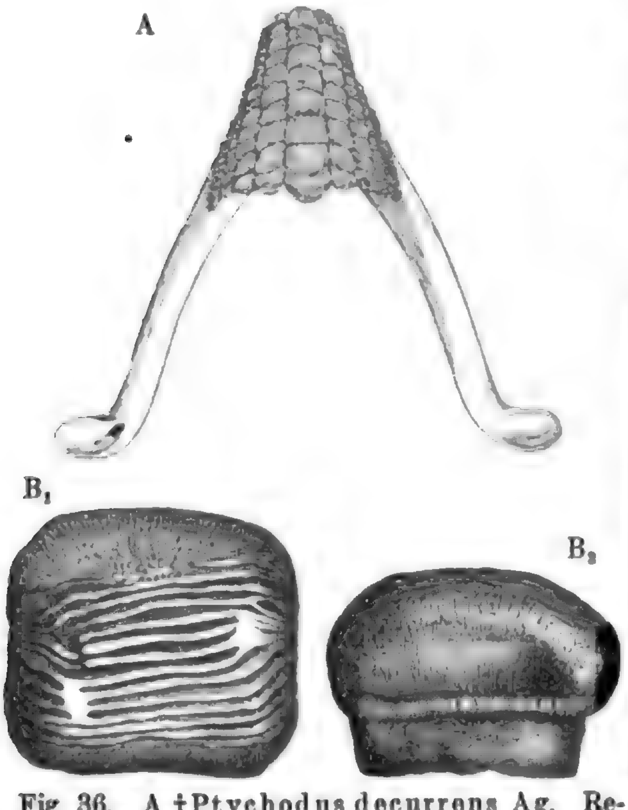


Fig. 36. A †Ptychodus decurrens Ag. Rekonstruierter Unterkiefer. Oberkreide; Sussex, England. Nach Traquair. Aus v. Stromer. B †Ptych. platygyrus Ag. 1 von oben, 2 von der Seite. Grünsand, Cenoman, Oberkreide; Regensburg. Aus Zittel.

Unter den †Myriacanthidae des Lias und Malm — mit höckerigen, paarigen Hautplatten auf Stirn (und Unterkiefer?) mit drei Paar oberen, einem Paar unteren Zahnplatten und einem Symphysenzahn, mit langem Rückenflossenstachel — ist †Acanthorhina E. Fraas (Oberlias, Württemberg) durch einen langen, mit Zacken besetzten, zugespitzten, verkalkten Rostralknorpel besonders ausgezeichnet. Bei †Chimaeropsis Zitt. (Malm) ist die Haut mit kleinen, konischen und radialgefurchten Placoidschuppen bedacht.

Den heute in atlantischen und pazifischen Wässern lebenden Chimaeriden (vgl. Zool. Teil S. 1063, Fig. 8) nahestehende Formen sind öfters fossil gefunden worden: †Ischyodus Egert (Fig. 38) (Dogger bis Kreide), †Aletodus Jaek. (Dogger), †Edaphodon Buckl. (Kreide bis Oligocän), †Brachymylus, †Pachymylus A. Sm.

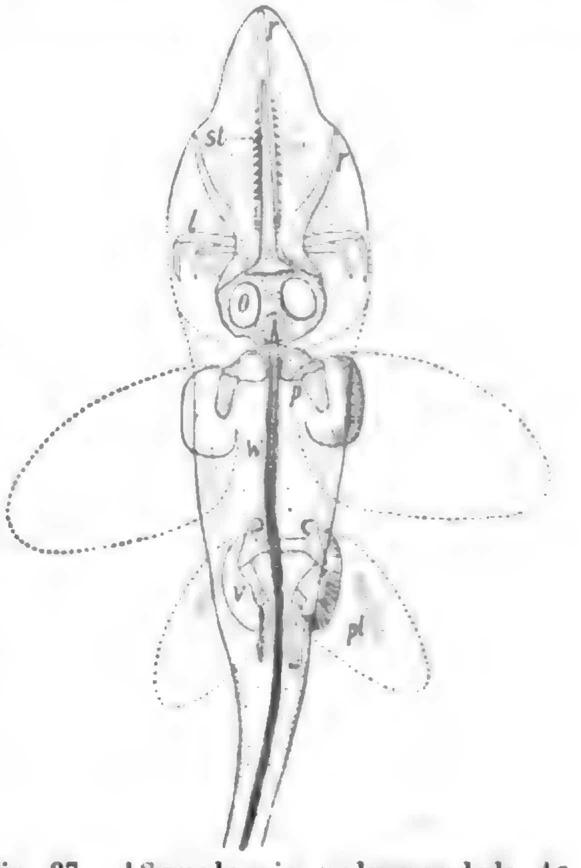


Fig. 37. †Squaloraja polyspondyla Ag. Verkleinerte Rekonstruktion eines ♂, von oben. l paarige Lippen(?)knorpel, O Augenhöhle, p Knorpel der Brustflossen, zwischen und vor ihnen die ± verwachsenen vordersten Wirbel, pl schütter über den Körper verstreute, gröbere Placoidschüppchen, r dreiteiliger Rostralknorpel, st Stirnstachel, v Beckengürtel mit Pterygopodien und vorderen Begattungsstacheln. Untere Lias; England. Nach B. Dean. Aus v. Stromer.

Digitized by Google

Woodw. (Malm), †Elasmodectes Newt. (Malm, Kreide), †Elasmodus Egert. (Alttertiär), Chimaera L. (Pliocän). Meist sind nur Zahnplatten mit verschieden angeordneten Reibhügeln bekannt; fossile Eikapseln aus dem Dogger Schwabens werden zu †Aletodus gestellt. Vollständigere Exemplare von †Ischyodus sind aus den lithographischen Schiefern Bayerns bekannt;

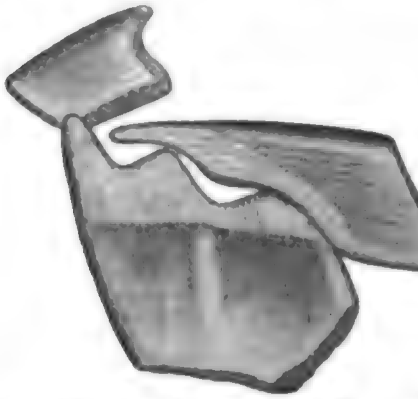


Fig. 38. †Ischyodus avitus H. v. M. Zahnplatten des Ober- und Unterkiefers von der Seite. Oberster Malm, Jura, lithographischer Schiefer. Eichstätt, Bayern. Nach Rieß. Aus v. Stromer.

sie zeigen im allgemeinen den Habitus von Chimaera, aber das Rostrum ist wesentlich mehr vorgezogen, und der hakenförmige, mit Zähnchen besetzte Stirnstachel des Männchens ist um vieles kräftiger als bei Chimaera.

Von Callorhynchiden sind vereinzelte Reste seit der Kreide (Neuseeland) bekannt.

Durch ihr sehr kompliziertes Schleimkanalsystem in der Kopfoberfläche, durch die Autostylie des Schädels, die starke Entwicklung der Rostralknorpel, durch die von unten nachwachsenden, eigenartigen Zähne mit ihren Reibbuckeln, durch die Bedeckung des äußerlich nur einen Kiemenspaltes durch ein vom Hyoidbogen ausgehendes Operculum, durch die ringförmigen Verkalkungen der Wirbelsäule sind die Holocephalen besonders spezialisiert. Ihre Verbindung mit den übrigen Elasmobranchiern ist nicht eindeutig festzustellen. Sie mögen mit den durch das Fehlen des Zahnersatzes charakterisierten †Cochliodontidae (S. 1128) des Paläozoikums in genetischer Verbindung stehen, und möglicherweise entstammen manche der sogenannten Ichthyodorulithen älterer paläozoischer Ablagerungen von Holocephalen oder ihnen nahen Formen. Trifft das zu, dann wären die Holocephalen eine schon sehr alte, besonders „gerichtete" Abzweigung des Elasmobranchierstammes.

Mit Ausnahme der an Oberflächenwasser gebundenen Chimaera Colliei bewohnen heute alle Holocephalen größere, zum Teil sehr erhebliche Tiefen der Ozeane (bis über 2000 m); aus dem seltenen Vorkommen der fossilen Reste meist in Flachwasserbildungen ließe es sich wohl entnehmen, daß tieferes, strandferneres Meer schon seit langen Zeiten das eigentliche Wohngebiet der Holocephalen ist.

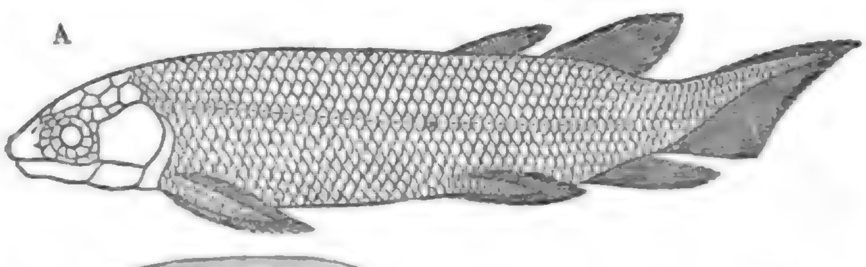
E. Unterklasse Dipnoi.

Lurchfische; vgl. Zool. Teil S. 1099 (Fig. 39 bis 41).

In den drei heute in Süßwässern der Südkontinente lebenden Lungenfischen Ceratodus, Protopterus und Lepidosiren haben wir die letzten und durch ihre schlanke bis aalförmige Gestalt mit diphyzerkem Schwanzflossensaum wie durch die zum Teil bis auf die Achse reduzierten Archipterygien in den paarigen Flossen besonders spezialisierten Ausläufer eines der langlebigsten und in vielem konservativsten Fischstämme.

Im tieferen Unterdevon, in der Fazies des alten roten Sandsteins treten die ersten[1]) Dipnoer unvermittelt auf: †Dipterus Sedgw. u. Murch. (Fig. 39) (mit einigen Verwandten auf das Devon der Nordhemisphäre beschränkt, häufig in Schottland). In den schmelzglänzenden Belegknochen des Kopfes treten

A



B

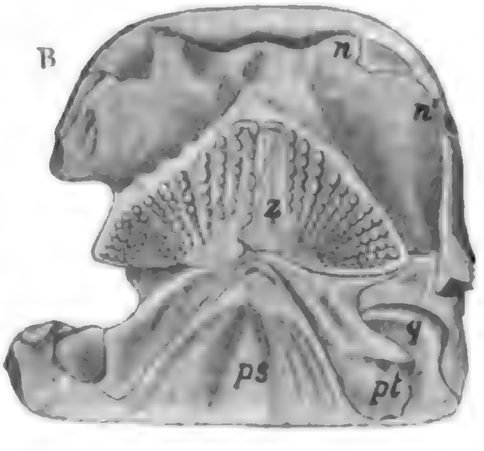


Fig. 39. †Dipterus Valenciennesi Sedgw. a. Murch. A verkleinerte Rekonstruktion von Traquair, B Vorderteil der Schädelunterseite; n, n' Nasengang, ps Parasphenoid, pt Palatinum, q Quadratum, z Gaumenzähne. Unterdevon, Oldred; Nordschottland. A aus Zittel. B aus v. Stromer.

[1]) Das Vorkommen von Dipnoern im Obersilur Portugals (†Ctenodus? nach F. Priem) ist ganz unsicher, vielleicht ist aber das unvollkommen bekannte †Ctenopleuron nerepisense G. F. Matth. aus dem Obersilur von St. John N. B. ein Dipnoer?

Digitized by Google

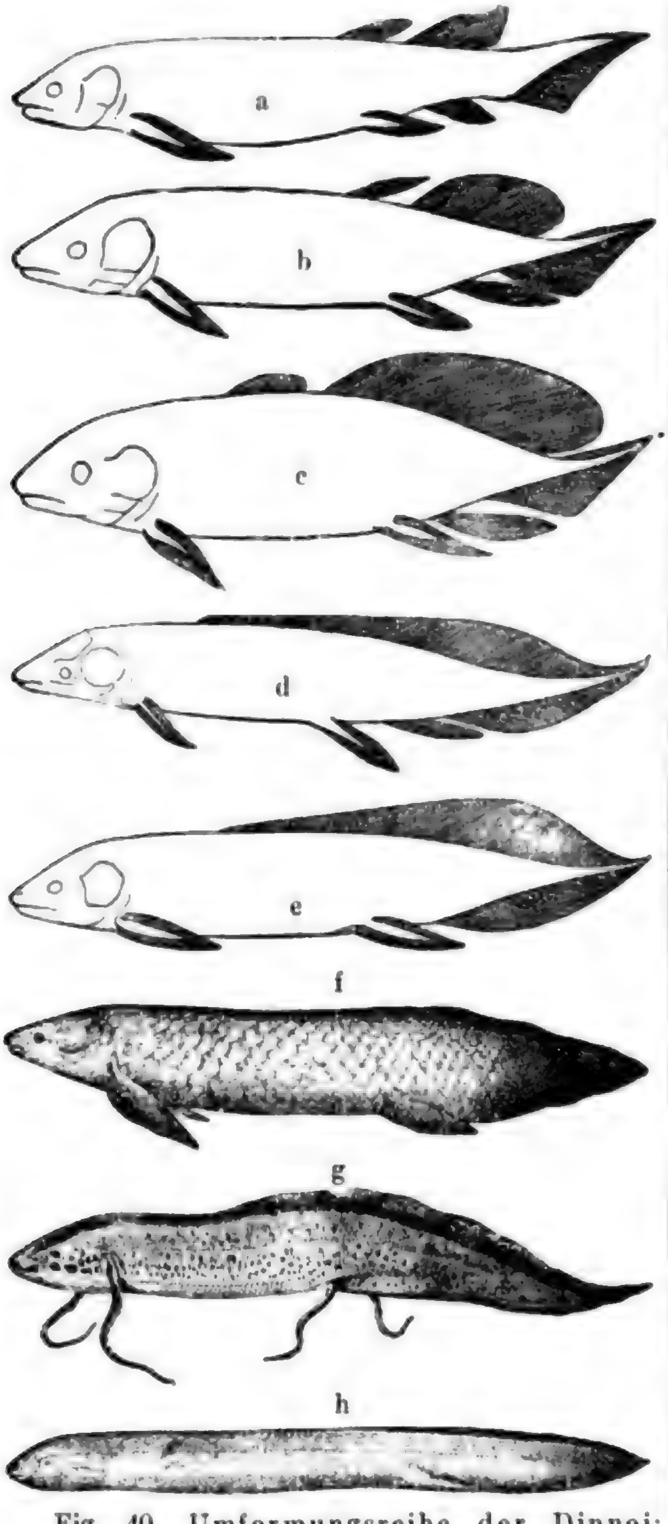


Fig. 40. Umformungsreihe der Dipnoi: Dorsalis 1 u. 2, die heterozerk-epibatische Caudalis und Analis werden allmählich zu einem diphyzerken Flossensaum, die ganze Gestalt wird allmählich aalförmig (g und h) und die paarigen Flossen werden ± fadenförmig reduziert. a †Dipterus Valenciennesi S. u. M. Unteres Unterdevon, Oldred; Schottland. b †Dipterus macropterus Traq. Oberes Unterdevon, Oldred; Schottland. c †Scaumenacia curta Whiteav. Unteres Oberdevon, Oldred; Kanada. d †Phaneropleuron Anderssoni Huxl. Oberes Oberdevon, Oldred; Schottland. e †Uronemus lobatus Ag. Unterkarbon; Schottland. f Ceratodus Forsteri Krefft. Lebend; Queensland, Australien. g Protopterus annectens Ow. Lebend; Afrika. h Lepidosiren paradoxa Fitz. Lebend; Südamerika.

überzählige Platten auf und zwar sowohl in der Mediane zwischen den Parietalia und Frontalia, als — in größerer Zahl — zwischen diesen und den die Orbitae umsäumenden Platten und dem großen Operkularapparat; paarige, kräftige Gularplatten liegen der Unterseite des Unterkiefers auf. Auf dem Pterygopalatinknorpel und auf dem Spleniale sitzen große, ± dreiseitige, Reibzahnplatten mit zahlreichen, gehöckerten Radialwülsten, welche — wie in der Ontogenie von Ceratodus (Fig. 40f, 41) zu erkennen — durch Konkreszenz kleinerer Kegelzähnchen entstanden sind. Der Rumpf ist mit kräftigen, schmelzglänzenden, feinstgekörnelten, imbrizierten Schuppen bedeckt. Bei diesen alten Formen sind noch zwei distinkte Rückenflossen, eine heterozerk-epibatische Caudalis, eine kleine Analis ausgebildet. Schon bei den †Phaneropleuridae des Oberdevon (†Scaumenacia Whiteav., Fig. 40c, und †Phaneropleuron Huxl, Fig. 40d. — mit isolierten kleinen Zähnen auf den Kieferrändern neben den Zahnplatten) findet eine allmähliche Umlagerung und ein Verfließen der

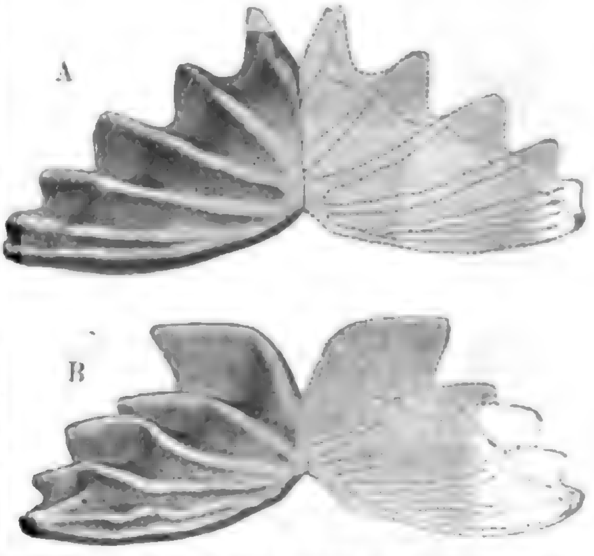


Fig. 41. Ceratodus †runciatus Plien. Zahnplatten A des Gaumens von unten, B des Unterkiefers von oben gesehen; oben die linke, unten die rechte ergänzt. Lettenkohle, Obertrias; Württemberg. Nach Teller. Aus v. Stromer.

unpaaren Flossen in der Richtung eines ungeteilten diphyzerken Flossensaumes statt, der dann bei dem unterkarbonischen †Uronemus Ag. (Fig. 40e) fertiggestellt ist, und über die karbonpermischen †Ctenodontidae (†Ctenodus Ag. mit dichtstehenden, gehöckerten Querwülsten auf den Reibzähnen, ohne Gularplatten) zu den meso-kaenozoischen Ceratodontidae und den kaenozoischen Lepidosirenidae persistiert. Vorläufer des lebenden Ceratodus (Epi- oder Neoceratodus) Forsteri Krefft sind seit der Untertrias bekannt. Bei Ceratodus ist die Zahl der Deckknochen des Kopfskeletts gegenüber der der †Dipteridae stark reduziert:

Digitized by Google

2 mediane unpaare Platten, die occipitale und „ethmoidale", 2 paarige laterale (Praefrontalia und Postorbitalia), wenige zirkumorbitale Platten und je ein Postfrontale bedecken den knorpeligen Schädel, — eine Reduktion der Plattenzahl, welche übrigens schon bei den paläozoischen †Phaneropleuron und †Ctenodus eingeleitet ist.

Bionomisch waren die Dipnoer aller Zeiten im wesentlichen auf Wässer der Landfesten beschränkt. Das ganz vereinzelte Vorkommen von †Dipterus und †Palaedaphus Ben. im marinen Devon Belgiens und des rheinischen Schiefergebirges, von Ceratodus in manchen Gesteinen aus Binnenmeeren der Trias und des Jura, und wenige andere marine Vorkommnisse bestätigen eigentlich nur, daß diese Formen Fremdlinge in den Meeren waren. Die größte Blüte der Dipnoi fällt in die Zeit des oberen Devon. Bis zur Trias waren sie — nach den bekannt gewordenen Funden — auf die Nordhemisphäre beschränkt; erst seit der Trias ist ihre Abwanderung nach den Südkontinenten festgestellt.

Die systematische Stellung der Dipnoer wird recht verschieden gedeutet. Allein um der Autostylie des Kopfskeletts willen, sie den Holocephalen oder den †Arthrodiren (bei welchen die Autostylie noch nicht erwiesen ist) nahe zu stellen, entbehrt genügender Beweiskraft. Ihrem Hautskelett nach (Schuppen mit Kosminschicht) haben sie Beziehungen zu den Crossopterygiern, mit denen sie bis zu gewissem Grade auch der Bau der paarigen Flossen verbindet (s. unten). Sie mögen darum den Teleostomen, denen sie von vielen auch direkt eingereiht werden, nächstverwandt sein. Da aber bei ihrem mit den Crossopterygiern gleichzeitigen ersten Auftreten, über die Art der Verbindung zwischen beiden Gruppen bestimmtes nicht ausgesagt werden kann, sind die Dipnoi hier als selbständige Unterklasse aufgefaßt, welche durch frühzeitige Erwerbung (?) der Autostylie und Beibehaltung (?) des Archipterygiums neben der Umbildung der Schwimmblase besonders spezialisiert erscheint.

F. Unterklasse **Teleostomi**.

Die im zoologischen Teil (S. 1099) als getrennte Unterklassen aufgeführten Ganoidei (dort auch die Dipnoi und Crossopterygii umfassend) und Teleostei werden hier unter Berücksichtigung des fossilen Materiales, wie heute von den meisten Ichthyologen, als Teleostomi vereinigt. Die weitaus überwiegendste Menge aller lebenden Meeres- und Süßwasserfische gehört hierher, ebenso in nahezu gleichem Verhältnis die der fossilen.

Nach dem Skelett der paarigen Flossen können, und zwar auf Grund weitest zurückliegender Trennung, die beiden Ueberordnungen der Crossopterygii Huxl. und der Actinopterygii A. Smith Woodw. unterschieden werden, welche letzteren die zwei nicht streng getrennten Ordnungen der Ganoiden im engeren Sinne und Teleosteer umfassen.

1. Ueberordnung und Ordnung. Crossopterygii Huxl.; vgl. zool. Teil, S. 1099.

Die paarigen Flossen der heute allein durch die Polypteriden des tropischen Afrika vertretenen Fische sind durch den Besitz beschuppter Achsen ausgezeichnet, in welchen — besonders in der Brustflosse — ein gegliedertes, ± deutlich auf ein Archipterygium zu beziehendes Achsenskelett nachzuweisen resp. anzunehmen ist.

In verschiedensten Stadien der Verknöcherung ist die Wirbelsäule bekannt. Während schon manche paläozoische Formen (†Rhizodontidae, Devon-Karbon) ringförmig verknöcherte Zentra besitzen, zeigen andere (†Holoptychiidae, Devon), selbst noch mesozoische Formen (†Coelacanthidae, Karbon-Kreide) lediglich Verknöcherungen der oberen und unteren Bögen; die lebenden Polypteriden weisen dann wieder weitgehende Verknöcherung auf: Vollwirbel mit amphizölen Zentren.

Den Kopf, dessen Knorpelskelett verschieden weit verknöchern kann, bedecken schmelzglänzende, meist ± rauh skulpturierte Belegknochen. In Zahl und Form entsprechen sie in vielem denen eines normalen Ganoidenschädels. Bei manchen paläozoischen Typen, den †Rhizodontidae, mehr noch bei den †Osteolepidae herrscht die Neigung der vorderen, medianen, paarigen Elemente — zum Teil mit Einschluß der Frontalia — zu einer einheitlichen fronto-ethmoidalen Platte zu verschmelzen. Zahlreiche überzählige Platten können die medianen paarigen Platten seitlich begleiten und zwischen der Umrahmung der Orbitae und dem gewöhnlich recht groß ausgebildeten Opercularapparat auftreten, der meist aus Operculum, Sub- und Präoperculum gebildet wird. Meist sind auch supra- resp. posttemporale Platten vorhanden. Ein Paar großer Gularplatten liegt auf der Unterseite des Unterkiefers; meist tritt dazu eine unpaare, mediane Platte und bei vielen paläozoischen Formen eine größere Zahl seitlicher Gularplättchen, welche aber nicht wie bei Actinopterygiern als Kiemenhautstrahlen ausgebildet sind. — Das Kiefergelenk ist typisch hyostyl. — Die Kieferränder sind mit Kegelzähnen besetzt, zu denen auf anderen Teilen des Maules, z. B. auf Splenialknochen, noch weitere Zähne kommen können. Häufig sind einzelne der letzteren größer, als Fangzähne, ausgebildet; und eigentümlich ist bei manchen alten Formen (†Holoptychiidae) die „dendrodonte" Struktur der Zähne: von zahlreichen, groben Vertikalkanälen der Mitte strahlen zum Rande vielfach verzweigte Dentinröhrchen; hierdurch sowie infolge von Einfaltungen der Schmelzwand erinnert das Strukturbild an das der Zähne triadi-

Digitized by Google

scher Labyrinthodonten (vgl. den Artikel †Stegocephalen).

Eigenartig ist bei dem devonischen †Onychodus das Vorkommen eines symphysealen Knochens im Unterkiefer, der — gekrümmt bis spiral gebogen — mit einer Reihe schlanker gebogener Zähne besetzt ist; das erinnert an die symphysealen Zahngruppen mancher paläozoischer Plagiostomen (†Campodus, †Edestidae? vgl. S. 1126/27).

Hin und wieder (†Osteolepidae e. p., †Glyptopomidae) liegt in der Grenze der Frontalia ein kleines Pinealforamen.

Die Belegknochen des Schultergürtels, Cleithrum, wozu Supraclavicula, Clavicula und ?Infraclavicula treten können, stoßen bei manchen oben an supra- resp. posttemporale Platten.

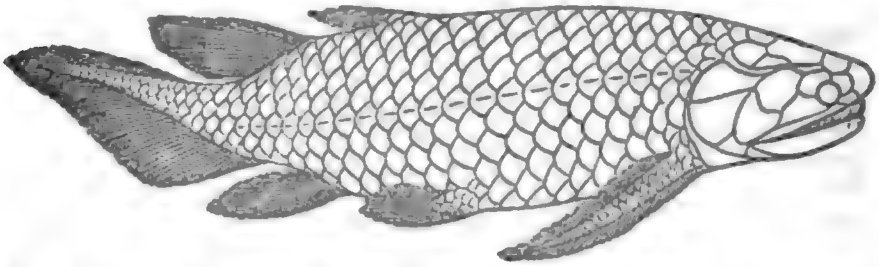


Fig. 42. †Holoptychius Flemingi Ag. 1/8 natürliche Größe. Rekonstruktion von Traquair. Oberdevon, Oldred; Fife, Schottland. Aus Zittel.

Erheblich schwankt die Form der Brustflossen. Die alten †Holoptychiidae (Fig. 42) zeigen sie in Gestalt einer schlanken, zugespitzten archipterygialen Flosse mit biserial geordneten Lepidotrichien, bei anderen (†Glyptopomus) ist sie ähnlich geformt, aber kürzer; häufig ist sie ± lappenförmig mit fächerförmig gestellten Lepidotrichien (†Osteolepidae e. p., †Coelacanthidae, Polypteridae), wieder bei anderen ist sie hinten ± gerade abgestutzt und wird so im Umriß trotz der beschuppten Achse einem normalen Actinopterygium ähnlich. Von nur sehr wenigen ist das Achsenskelett bekannt. Bei dem devonischen †Eusthenopteron z. B. ist eine wenig gliedrige mediale Achse mit wenigen präaxialen und reduzierteren postaxialen Radien vorhanden. Für das ganz eigenartige Achsenskelett der Polypteridae (vgl. Zool. Teil, S. 1069, Fig. 23), wo ein stabförmiges „Pro- und Metapterygium" mit dazwischen liegender „mesopterygialer", zentral verknöcherter Knorpelplatte an ein distinktes Scapulare und Coracoideum gelenkend, eine Bogenreihe kräftiger Basalradien der lappenförmigen Flosse tragen, ist unter älteren Formen kein vorbereitendes Stadium bekannt; wenigstens läßt sich dieses Skelett von dem der †Coelacanthidae, wo nur einmal Reste eines Basipterygiums und präaxialer Radien beobachtet wurden, kaum so ableiten, wie Gegenbaur das zeichnerisch konstruierte.

Die Bauchflosse — gewöhnlich die kleinere, bei Calamoichthys ganz reduziert — hat, wie aus †Eusthenopteron und Polypterus zu schließen ist, wohl durchgängig ein einfacheres Achsenskelett besessen.

Unpaare Flossen sind primär in der Zahl von 2 Dorsales, 1 Caudalis, 1 Analis vorhanden. Die heterozerk-epibatische spitz auslaufende Caudalis (†Holoptychius, †Osteolepis) wird häufig und in verschiedener Weise ± diphyzerk: wie ein kurzes, breites, hinten etwas zugespitztes Ruderblatt (†Diplopterus, †Glyptopomus) oder gerundet (Polypteridae), oder so, daß die nach hinten spitzig ausgezogenen oberen und unteren Segel und ein axialer Fortsatz die Flosse dreizackig machen (†Tristichopterus, †Eusthenopteron), resp. ragt eine kleine, axiale Pinselflosse über den hohen oberen und unteren Saum hinaus (†Coelacanthidae). Einmal, bei dem winzigen, sonst wenig bekannten, devonischen †Tarrasius, ist das Zusammenfließen der unparen Flossen zu einem ungeteilten Saum festgestellt. Die endoskelettalen Träger der Lepidotrichien in den unpaaren Flossen sind, soweit bekannt, meist in nur geringer Zahl vorhanden; nur im oberen und unteren Segel der Caudalis von †Coelacanthiden wird die Zahl der Träger und Lepidotrichien gleich, und in der aus einem ungeteilt mit der Schwanzflosse zusammenhängenden Saum hervorgehenden eigenartigen Rückenflosse der Polypteridae ist die Zahl der Träger und der groben Schuppen mit den Fähnchen aus Lepidotrichien (vgl. Zool. Teil, S. 1099, Fig. 54) gleich.

Die Schuppen der Crossopterygier sind rhombische oder ± zykloidisch geformte Kosmoidschuppen, die außen verschieden verziert sein können. Die Polypteridae nehmen, wie auch in anderem, durch den Ganoinüberzug ihrer Schuppen eine Sonderstellung ein. Das Seitenliniensystem setzt von den Rumpfflanken auf die Belegknochen des Kopfes über und zeigt hier einen sehr komplizierten Verlauf.

Die hier zusammengefaßten Crossopterygier lassen sich in eine Anzahl von Familiengruppen, Unterordnungen, bringen, welche untereinander zum Teil so wenig Zusammenhänge erkennen lassen, daß Goodrich z. B. sie als ganz selbständige „Divisionen" der Teleostomen auf-

Digitized by Google

faßte. In der Tat ist unser Wissen über diese Fische so unvollständig, daß die Zusammenfassung als eine Ordnung nur eine provisorische Ausflucht bedeutet. Einigermaßen natürlich erscheint die Aufstellung von 4 „Unterordnungen": †Holoptychii, †Osteolepidi, †Coelacanthidi, Polypteridi.

A. Smith Woodward's und Cope's Einteilung in Haplistia (†Tarrasius), Rhipidistia (†Holoptychii, †Osteolepidi), †Actinistia (†Coelacanthidi) und Cladistia (Polypteridi) nach dem Verhältnis der Träger zu den Strahlen in den unpaaren Flossen klärt ebensowenig die phyletischen Beziehungen wie Goodrich's Verteilung der Crossopterygier auf 3 Divisionen †Osteolepidoti (†Holoptychii, †Osteolepidi), †Coelacanthini, Polypterini, welche er je als der Gesamtheit der Actinopterygii systematisch gleichwertig auffaßte.

1. Unterordnung †Holoptychii: zum Teil recht großwüchsig werdende Fische mit zykloidischen, skulpturierten Schuppen, mit zahlreichen seitlichen Gularplatten, ohne Pinealforamen. Familien: †Holoptychiidae, †Rhizodontidae.

†Holoptychiidae: Brustflossen schlank zugespitzt mit langer, beschuppter Achse, mit biserial geordneten Lepidotrichien; Schwanzflosse schlank heterozerk-epibatisch; Zähne dendrodont; Wirbelsäule ohne Verknöcherung der Zentra. †Holoptychius Ag. (†Glyptolepis Ag., †Dendrodus Ow.), Fig. 42, Devon.

†Rhizodontidae: zum Teil sehr groß werdende Fische mit kurzer, hinten ± gerade abgestutzter Brustflosse mit weniggliedrigem, modifiziert archipterygialem Achsenskelett; Schwanzflosse hoch, dreizipflig, selten hetero-diphyzerk, meist diphyzerk; Wirbelzentra zum Teil ringförmig verknöchert; Zähne unten längsgefaltet; vordere Deckknochen des Kopfes ± verwachsen. †Tristichopterus Eg., †Eusthenopteron Whiteav. Devon; †Rhizodus Ow., †Rhizodopsis Newb., Karbon.

Den †Holoptychii ist wohl auch die unvollkommen bekannte Gattung †Onychodus Newb. (Devon) mit bezahntem Symphysenknochen zuzurechnen.

2. Unterordnung †Osteolepidi, Jaek. Meist schlanke, kleinere Fische mit rhombischen bis rhomboidischen Schuppen, mit ± kurzer Achse der Brustflossen mit ± weit verwachsenen vorderen Kopfdeckknochen, meist mit Pinealforamen, selten mit ringförmig verknöcherten Wirbelzentren. — Zwischen den †Osteolepidi und †Holoptichii vermittelnde Formen sind unbekannt; die Verschmelzung der vorderen Schädeldeckknochen bei den †Rhizodontidae und †Osteolepidae kann nur als parallele Entwickelung aufgefaßt werden. Familien: †Glyptopomidae, †Osteolepidae.

†Glyptopomidae: Sehr schlanke Fische mit skulpturierten, rhomboidischen Schuppen, mit kurz zugespitzter, noch biserial gebauter Brustflosse; beide Dorsales liegen weit hinten, sie korrespondieren mit der Ventralis und Analis, die Schuppen reichen ± weit auf diese Flossen hinauf; Schwanzflosse kurz zugespitzt, diphyzerk; vordere Schädeldeckknochen nicht verwachsen; die mittlere Gularplatte fehlt. †Glyptopomus Ag. (†Glyptolaemus Huxl.), Fig. 43, Devon.

†Osteolepidae: Die rhombischen Schuppen und die Deckknochen sind glatt; die vorderen Schädeldeckknochen sind verwachsen, an der Basis der unpaaren Flossen kommen größere Schuppen, und an den Vorderrändern der Dorsales Fulkra vor. †Osteolepis Ag. (Devon), Fig. 44, hat eine heterozerke, †Diplopterus Ag. (Devon) eine kurze, zugespitzt spatelförmige, hetero-diphyzerke Schwanzflosse; bei †Megalichthys Ag. (Karbon, Perm) fehlt das Pinealforamen.

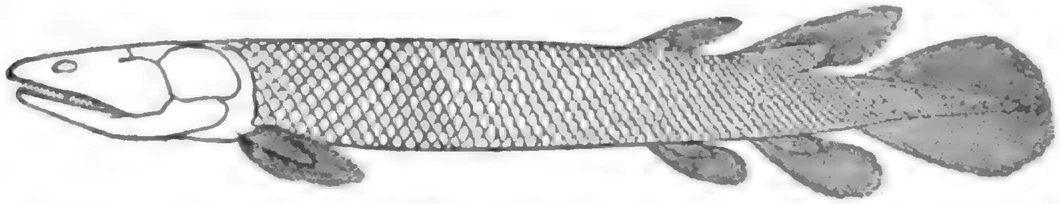


Fig. 43. †Glyptopomus Kinnairdi Huxl. Oberdevon, Oldred; Schottland. Verkleinert. Die hier hinten stumpfe Schwanzflosse ist nach anderen Rekonstruktionen kurz zugespitzt. Aus Abel.

Die Vereinigung der †Glyptopomidae und †Osteolepidae hat lediglich auf Grund der Beschuppung, des gewöhnlich vorhandenen Pinealforamens und der Neigung zur Unterdrükkung der seitlichen Gularplattenreihen stattgefunden.

Vielleicht ist der winzige, ungenügend bekannte, †Tarrasius Traq. (Unterkarbon, Schottland) mit diphyzerkem Flossensaum ohne distinkte Dorsales und Analis hier anzuschließen? A. Smith Woodward gründete auf ihn die besondere Untergattung †Haplistia.

3. Unterordnung †Coelacanthidi. Den beiden vorigen Gruppen stehen ganz isoliert gegenüber die vom (Devon?) Karbon bis in die Kreide verbreiteten Fische, die sich um †Coelacanthus und †Undina ordnen. Während ihre unverknöcherte Wirbelsäule als primitiverer Charakter aufzufassen ist, erweisen sich andere Merkmale als Anzeichen weitgehender Spezialisierung zum Teil stark progressiver Natur, so die übereinstimmende Zahl der Träger und Strahlen im oberen und unteren langen Segel der Schwanzflosse, die reduzierte

Digitized by Google

Zahl der Kopfdeckknochen, das Operculum ohne (?) Suboperculum, die Verwachsung von Hyomandibulare mit Quadratum und Pterygoid. Die paarigen Flossen mit ganz kurzer

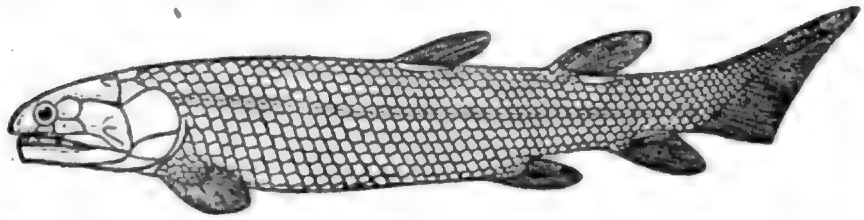


Fig. 44. †Osteolepis macrolepidotus Ag. Verkleinerte Rekonstruktion von Traquair. Devon, mittlerer Oldred; Schottland. Aus Zittel.

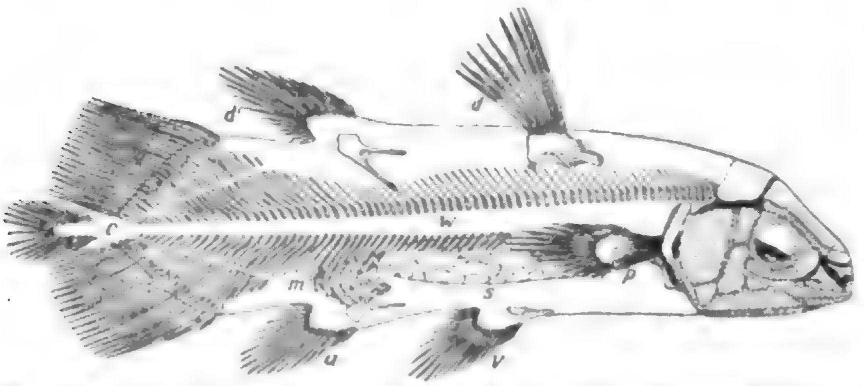


Fig. 45. †Undina acutidens O. M. Reis. Skelettkonstruktion von Reis, $^1/_4$ natürliche Größe. a Afterflosse, c diphyzerke Schwanzflosse mit Pinselflosse, d, d' Dorsalis 1 und 2, m fossile Muskelsubstanz, p Brustflosse, s Schwimmblase mit verkalkter Wand, v Bauchflosse, W Wirbelsäule (ohne verknöcherte Zentra). Oberster Jura, lithographischer Schiefer; Solnhofen, Bayern. Aus v. Stromer.

Achse und die Dorsales wie die Analis sind lappenförmig, ± oval; und ganz eigenartig sind die einfachen oder gabelig geteilten Endoskelettalplatten, welche die Dorsales und die Analis stützen. Eine besondere Note erhalten die †Coelacanthiden durch die Verfestigung der Schwimmblasenwand mittels Reihen verkalkter Blätter. Der ziemlich hohe Körper war mit dünnen zykloidischen Schuppen bedeckt. — Familie †Coelacanthidae: †Coelacanthus Ag., Karbon bis Trias(?); †Graphiurus Kner, †Diplurus Newb., Trias; †Undina Mstr., Jura, Fig. 45; †Macropoma Ag., Kreide.

4. Unterordnung Polypteridi (Zoologischer Teil, S. 1093, 1099, 1100). Wieder eine ganz isolierte Stellung nehmen die Polypteriden ein mit ihren rhombischen, mit Ganoin bedeckten Schuppen, durch ihr weit verknöchertes Innenskelett mit amphicölen Vollwirbeln, ihre besondere Ausbildung des Brustflossenskeletts (Zoologischer Teil, S. 1069, Fig. 23) und den eigenartigen Bau der Rückenflosse, durch die zahlreichen überzähligen Platten zwischen Schädeldach und Wangen bei fehlenden seitlichen Gularplatten. Zu keinem der übrigen Crossopterygiertypen lassen sich bestimmte Verbindungen konstruieren. Familie: Polypteridae. Wenige Reste sind aus dem Eozän Aegyptens bekannt. Polypterus Geoffr., Calamoichthys Smith.

Verbreitung. Die Crossopterygier treten (abgesehen von isolierten, an †Holoptychius erinnernden Schuppen, †Eriptychius americanus Walc., sehr fraglichen untersilurischen Alters, von Canyon City) zuerst im unteren Devon der Nordhemisphäre auf; und zwar gehören sie hier vorwiegendst der Oldredfazies an, zu deren wichtigsten Charakterfossilien die †Osteolepidi und †Holoptychii (diese besonders im Oberdevon) zu zählen sind. Wohl sind auch Vorkommnisse aus marinen Ablagerungen bekannt, doch diese stellen sich erst ein wenig häufiger im Oberdevon ein. Erst unter den †Coelacanthiden des Mesozoikum werden marine Vorkommnisse die Norm (z. B. †Undina, †Macropoma). Die Polypteriden sind dann wieder an Wässer des Landes gebunden. — Repräsentieren die Crossopterygier einen Stamm, dann wird aus der Art des Vorkommens der fossilen Formen ihr unbefriedigendes systematisch-phyletisches Bild klar: Ihre Stammesentwicklung war im wesentlichen an Süßwässer der Landfesten gebunden, von deren Sedimenten naturgemäß nur lückenhafte Ueberlieferung berichtet. Nur ein Ast, die †Coelacanthiden, scheint zu reinem Meeresleben überzugehen. Und die jüngsten, so unvermittelt dastehenden Polypteriden mögen von ihren ersten Anfängen an, welche vielleicht den †Osteolepiden näher standen, dauernd an Süßwässer gebunden gewesen sein.

2. Ueberordnung. Actinopterygii A. Sm. Woodw. (Ganoidei und Teleostei).

Die paarigen Flossen der Ganoiden im engeren Sinne und der Knochenfische zeigen nicht die „lappige" Form der Crossopterygierflossen. Ihr axiales (basales) Skelett ist weitgehend reduziert in den paarigen Flossen der Störe und in den Brustflossen der übrigen Ganoiden, ganz unterdrückt ist es in den Bauchflossen der holosteiden Ganoiden und der Teleosteer. Die Stelle der seitlichen Gularplättchen wird von Branchiostegalstrahlen eingenommen. Nicht selten werden besonders von Teleosteern fossile Gehörsteinchen, Otolithen, gefunden, deren

Digitized by Google

Einreihung in bestimmte Gattungen namentlich Koken gelungen ist.

1. Ordnung: Ganoidei, Schmelzschupper, vgl. Zoologischer Teil, S. 1099 (Chondrostei), S. 1100 (Holostei).

Die heute in nur wenigen Typen (Störe, Löffelstöre, Amia und Lepidosteus) lebenden Schmelzschupper waren im Paläozoikum und der Trias die alleinherrschenden Actinopterygier; vom Jura an wurden sie langsam durch die Teleosteer ersetzt.

Abgesehen von anatomischen Merkmalen des Weichkörpers liegen die besonderen, paläontologisch verwertbaren, wenn auch nicht scharf abgrenzenden Charakteristika der Ganoiden in der Ausbildung ihres Schuppenkleides, ihres Innenskelettes und in der Ausbildung der Flossen. Zwei „Kohorten" lassen sich je nach Kombinationen varianter Ausbildung dieser Charaktere unterscheiden, die Chondrostei (mit den heute lebenden Stören und Löffelstören) und die sich mehrfach den Knochenfischen nähernden Holostei (mit Amia und Lepidosteus).

Die normalen Ganoidschuppen sind rhombisch, greifen an ihren Vorder- und Hinterrändern ± weit übereinander. Der Aufbau der Schuppen — aus ± dichter knöcherner (Isopedin-) Basis und aufliegender schmelzähnlicher Ganoinschicht — ist konzentrischschalig: jede Isopedinlage geht nach oben in eine Ganoinlage über; in der Uebergangszone kann sich (bei paläozoischen †Heterocerci, Chondrostei) eine an verzweigten horizontalen Kanälen reiche Lage und hierüber noch eine Kosmin- oder Dentinartige Lage zwischen Knochen und Ganoin einschalten. Die echten Ganoidschuppen werden in ihrer Knochenbasis von ± schrägen Kanälen durchzogen. Eine verdickte Knochenleiste der Basis („Hautrippen" bildend) kann über den Rand der einen Schuppe in eine entsprechende Aushöhlung am Unterrande der benachbarten greifen; das ergibt bei der Mehrzahl der Ganoiden eine Gelenkung und Verfestigung des häufig sehr massiven Schuppenpanzers. Auf mehreren Stammlinien der Ganoiden greift in verschiedener Weise Reduktion resp. Umformung der Schuppen ein. Bei den Chondrostei (bereits bei wenigen †Heterocerci) verschwinden die Rumpfschuppen bei den Chondrosteidae, Accipenseridae und Polyodontidae bis auf die Schuppen der hinteren Schwanzregion oder, wie ähnlich auch bei den †Belonorhynchidae, bis auf Reihen von ganoinlosen Knochenschildern. Außer seltenem Verschwinden der Schuppen kommt — selten bei †Heterocerci, häufiger bei den †Holostei — Umbildung der rhombischen Schuppen zu zykloidischen vor unter Rückbildung der Ganoin- und Knochenlage und unter Aufgeben der Gelenkung.

Die ursprünglich knorpelige Wirbelsäule mit persistierender Chorda kann ganz knorpelig bleiben (Störe) oder ± weit verknöchern. Bei den Chondrostei beschränkt sich die Verknöcherung auf obere und untere Bögen, Fortsätze und Flossenträger. Bei den Holostei findet verschiedenartigste Verknöcherung statt: Verknöcherung nur der oberen und unteren Bögen (mit Fortsätzen und Rippen) führt zur Bildung von Nacktwirbeln (†Pycnodonti); bogenförmige Hypocentra und Pleurocentra können ventral und dorsal die Chorda umgeben — Halbwirbel, bei vielen Orthoganoiden und Amioiden; Hypo- und Pleurocentra können zu Ringen auswachsen, die getrennt ± hintereinander liegen oder miteinander verschmelzen — Hohl- oder Ringwirbel, wieder bei vielen †Orthoganoiden und Amioiden; weitergehende Verknöcherung führt zur Bildung von Vollwirbeln mit amphizölen (†Oligopleuridae, Amfidae), bei den Lepidosteidae mit opisthozölen Wirbelkörpern.

Häufig ist die Verknöcherung der Wirbelsäule im Schwanz eine vorgeschrittenere als im Rumpf, doch kommt auch das Umgekehrte vor. Bei den Holostei entspricht (mit Ausnahme von Lepidosteus) im allgemeinen stärkere Verknöcherung der Wirbelsäule vorschreitender Reduktion der Ganoidschuppen (Schwächung des Schutz-, Stärkung des Stützskeletts!); bei den Chondrostei hat diese Relation nicht statt.

Mit stärkerer Verknöcherung der Wirbelsäule geht gewöhnlich stärkere Verknöcherung des Knorpelcraniums Hand in Hand (bei vielen Holostei).

Die Deck- und äußeren Ersatzknochen des Schädels sind meist schmelzglänzend. Hinter den paarigen Elementen des Schädeldaches (Nasalia, Frontalia, Parietalia ohne Pinealloch) liegen post- und supratemporale Platten, in verschieden großer Zahl treten zirkum- und suborbitale Platten auf, außerdem Squamosa, Maxillaria, Praemaxillaria, Ethmoideum und, nicht konstant, Prae- und Postfrontalia, ferner Supramaxillaria. Bei den Accipenseridae (Chondrostei) und den †Pycnodonti (Holostei) kommen überzählige mediane Platten vor, ebenso ± zahlreiche rostrale oder ethmoidale, und bei Lepidosteus (Holostei) präoperkulare und maxillare Platten. Im Operkularapparat der Holostei (hier meist mit Interoperculum) tritt das Praeoperculum allmählich in ± innige Verbindung mit den Pterygopalatinen und dem Mandibularbogen. Die ursprünglich zahlreichen Branchiostegalia werden sowohl bei den Chondrostei (Chondrosteoidei) wie auch bei manchen Holostei ± weit reduziert. Meist ist eine unpaare Gularplatte vorhanden.

Die Interclavicula im Schultergürtel

Digitized by Google

der Chondrostei wird bei den Holostei mit dem Cleithrum vereinigt.

Die Vorderränder aller Flossen können mit Fulkren besetzt sein; bei abgeleiteten resp. mehr zu den Teleosteern neigenden Gruppen tritt der Fulkrenbesatz zurück. In der Dorsalis und Analis ist bei den Chondrostei die Zahl der Strahlen zumeist größer als die der Träger, und diese wieder größer als die der zugehörigen Segmente der Wirbelsäule; bei den Holostei werden wie bei den Knochenfischen die Zahlen der Strahlen, Träger und Flossen gleich.

Die Schwanzflosse ist (? aus ursprünglich diphyzerkem Flossensaum hervorgehend [Dollo]) bei den Chondrostei anfangs schlank unten weit nach vorn reichende Bogenzone; mittlere paarige Gularplatten fehlen. Der oben an Posttemporalia angegliederte Schultergürtel hat noch eine distinkte Interclavicula. Die Chorda persistiert: nur Bögen und Fortsätze und die Flossenträger, deren Zahl in der Dorsalis und Analis kleiner ist als die Zahl der meist mit Ganoin überzogenen Strahlen, können verknöchern. Spitzige Zähnchen sitzen auf den Kieferrändern. Familien: †Palaeoniscidae (Unterdevon bis Jura), †Catopteridae (Trias), †Platysomidae (Karbon, Perm).

†Palaeoniscidae. Aus der Oldredfazies des schottischen Unterdevon (und aus dem Devon Kanadas) ist der erste der meist schlan-

Fig. 46. †Cheirolepis Trailli Ag. Rekonstruktion von Traquair und A. Sm. Woodward. 1/4 natürlicher Größe. Unteres Oldred, Mitteldevon; Schottland. Aus Jaekel.

heterozerk-epibatisch; dieser innerlich heterozerke Bau bleibt meist deutlich erhalten, aber die äußere Form kann namentlich bei den Holostei in verschiedener Weise hemiheterozerk, homozerk bis (sekundär) diphyzerk werden.

1. Kohorte. Chondrostei (Unterordnungen: †Heterocerci, Chondrosteoidei, ?†Belonorhynchidi).

1. Unterordnung. †Heterocerci. Unterdevon-Jura (Fig. 46, 47).

Als Ausgangsformen der Ganoiden sind die †Heterocerci aufzufassen: Meist spindelförmige Fische mit ausgeprägtester Heterozerkie (das untere Segel der Schwanzflosse ist hinten ± tief ausgeschnitten, in seinem vorderen Teil hoch; das obere Segel wird durch eine Reihe von Fulkren ersetzt, welche der beschuppten Schwanzachse aufliegen). Die gewöhnlich rhombischen Schuppen sind durch eine gefäßreiche und eine kosminartige Lage zwischen der Knochenbasis und der Ganoinschicht von den normalen Ganoidschuppen unterschieden; die Schuppenreihen des aufwärts gebogenen Schwanzes sind abweichend von denen des Rumpfes geordnet. Die Vorderränder der Flossen sind meist mit kräftigen Fulkren besetzt. In den schmelzglänzenden Belegknochen des Kopfes bildet der große Operkularapparat (ohne Interoperculum) mit zahlreichen groben Branchiostegalstrahlen eine stark gekrümmte, ken Paläonisciden bekannt: †Cheirolepis Ag., Fig. 46, ein Fisch, dessen rhombische Schuppen, auffallend klein, an das Schuppenkleid des alten Haies †Acanthodes erinnern. Häufiger werden die Paläonisciden mit normal großen Rhombenschuppen im Karbon (†Nematoptychius, †Rhadinichthys, †Canobius Traq., †Eurylepis Newb., †Elonichthys Gieb.) und besonders im Perm, dessen Süßwasser- und Binnenmeerbecken sie in großer Zahl bevölkerten (†Amblypterus Ag., †Elonichthys Gieb., †Pygopterus Ag., †Acrolepis Ag. und namentlich †Palaeoniscus Bl., Fig. 47). Auch in den Brack- und Süßwasser- wie in den Meeresbildungen der kontinentalen Trias von Europa, Nordamerika, Südafrika und Australien, also in weitester Verbreitung sind sie bekannt (†Gyrolepis Ag., †Atherstonia A. Sm. W., †Helichthys Broom, †Myriolepis Eg.). Vereinzelt gehen sie noch in die Meere des Jura (†Centrolepis Eg., †Oxygnathus Ag.), wo der kleinwüchsige †Coccolepis Ag. durch die Erwerbung zykloidischer Schuppen auffällt, die übrigens schon einmal früher vorkommen bei †Trissolepis Fr. (Perm, Böhmen). Neben schlanken kommen auch einzelne hochwüchsige dann an die †Platysomidae erinnernde Typen vor: †Cleithrolepis Eg. †Hydropessum Broom (Trias, Australien, Südafrika).

†Catopteridae. Enge schließen sich an die †Paläoniscidae †Catopterus Redf. und †Dictyopyge Eg. aus der kontinentalen Trias der Nord- und Südhemisphäre; schlankgestreckte Fische mit äußerlich ± homozerkem Schwanz, dessen Achse weniger weit beschuppt ist.

Digitized by Google

†Platysomidae. Im Karbon und Perm treten zu den †Paläonisciden die ihnen nächstverwandten †Platysomiden: hoch werdende, seitlich stark komprimierte Fische, meist mit hohen Rhombenschuppen; Dorsalis und Analis werden zu langgestreckten, vorne erhöhten Flossensäumen; die sonst wie bei den †Paläonisciden gebaute Caudalis ist hinten sehr tief gebuchtet und kann ein besonders langes unteres Segel herausbilden, wobei die Umrißform der Flosse ± homozerk wird. Die Zähne sind niedrig stumpf konisch. †Eurynotus Ag., †Mesolepis Young zeigen den Uebergang von schlanken Paläonisciden zu den hohen †Platysomus Ag. und †Cheirodus Traq. (letzterer ohne Bauchflossen?, in der Form lebhaft an den lebenden Teleosteer †Psettus erinnernd). †Platysomus ist neben †Palaeoniscus der häufigste Fisch des deutschen Kupferschiefers (Oberperm); der dort ebenfalls vorkommende †Dorypterus Germ. fällt durch die Reduktion seines Schuppenkleides bis auf wenige, nach oben in schlanke Fäden ausgezogene Ventralschuppen auf.

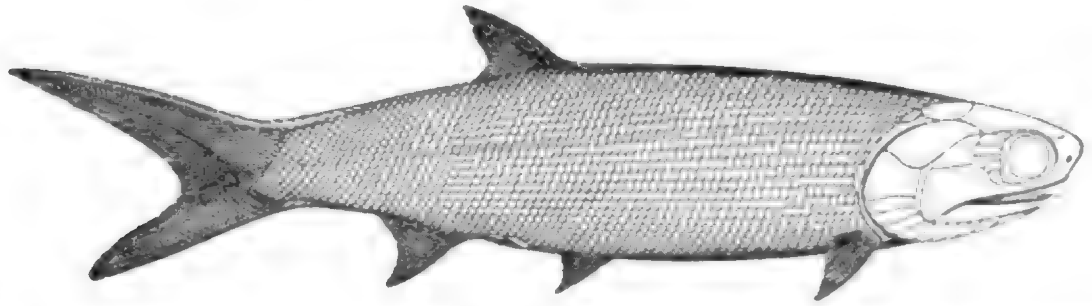


Fig. 47. †Palaeoniscus Freieslebeni Ag. Oberperm, Zechstein, Kupferschiefer; Thüringen. ½ natürlicher Größe. Nach Traquair. Aus Jaekel.
Die vordere, stumpfe Begrenzung des Mandibulare ist beim Druck ausgeblieben.

2. Unterordnung. Chondrosteoidei (Störe, Knorpelganoiden); vgl. Zoologischen Teil S. 1068, Fig 19—21, S. 1099.

Nach Traquair und A. Smith Woodward sind von den †Heterocerci, speziell wohl von den †Palaeoniscidae, bei welchen in †Phanerosteon Traq. des Karbon bereits eine Reduktion des Schuppenpanzers vorkommt, die Störe im weiteren Sinne, die †Chondrosteidae, Accipenseridae und Polyodontidae geworden. †Chondrosteus Ag. aus dem Unterlias und †Gyrosteus Ag. (Oberlias) von England zeigen wohl den eingeschlagenen reduktiven Weg: Bis auf den mit rhombischen Schuppen bedeckten Schwanz ist der Körper nackt, die vorderen und ein Teil der seitlichen Belegknochen des Kopfes sind ganz reduziert, das Visceralskelett ist nur schwach ausgebildet; in dem (doch wohl ventral gelegenen) Maul fehlen Zähne; eine größere Zahl kräftiger Branchiostegalstrahlen und eine distinkte Interclavicula ergeben aber noch Uebereinstimmungen mit den †Palaeonisciden; an der knorpeligen Wirbelsäule sind im Schwanz kräftigere Bögen ausgebildet; der Ganoinbelag der feingegliederten Flossenstrahlen ist dünn.

Die Polyodontidae mit weitestgehender Reduktion der Schädelknochen, mit mächtigem Knorpelrostrum, ohne Branchiostegalstrahlen sind wohl bis zur Kreide zurück zu verfolgen (†Pholidurus A. Sm. W.), während die ältesten Reste der Accipenseridae (mit neu erworbenen?, sehr zahlreichen, überzähligen Belegknochen des Schädels) aus dem Eozän bekannt sind.

3. Unterordnung. †Belonorhynchidi. A. Smith Woodward rechnet den Chondrostei noch die †Belonorhynchiden zu: sehr schlanke Fische, welche durch die Reduktion des Schuppenkleides bis auf 4 Längsreihen — je eine dorsal, ventral und lateral — eine gewisse Parallele zu den Accipenseriden bilden. Ihr Schädel, mit im Alter verwachsenen Deckknochen, ist in eine sehr schlanke Schnauze ausgezogen, deren Kiefer mit spitzen Zähnen besetzt sind; der Operkularapparat ist stark reduziert, Branchiostegalstrahlen fehlen; die paarigen Flossen sind klein. Dorsalis und Analis mit mehr Strahlen als Trägern liegen weit hinten, sind meist kurz und hoch; die hinten fast senkrecht abgeschnittene, dreiseitige Schwanzflosse ist diphyzerk; Fulcra fehlen. Die Chorda persistiert, aber Bögen, Fortsätze (die oberen mit Zygapophysen!) und Rippen sind verknöchert. Durch die teils primitiven, teils vorgeschrittenen Merkmale ist die Stellung der †Belonorhynchidae ganz unsicher; O. M. Reis wollte sie zu den Crossopterygiern stellen. †Saurichthys Ag., Trias; †Belonorhynchus Br., Fig. 48, Trias, Lias.

2. Kohorte. Holostei (Unterordnungen: †Orthoganoidei, †Pycnodonti, †Aspidorhynchoidei, †Amioidei, †Lepidosteidei); vgl. Zoologischen Teil S. 1100.

Die in progressiver Entwickelung des Innenskeletts und in der Umbildung der Schuppen zu zykloidischen, sowie in der Gestaltung der Schwanzflosse Teleosteercharaktere gewinnenden Holostei sind der

Digitized by Google

jüngere, erst seit dem Perm bekannte Stamm der Ganoiden. Nach der Ausbildung der Schuppen, der Schwanzflosse, des Fulkrenbesatzes der Flossen und des Gebisses

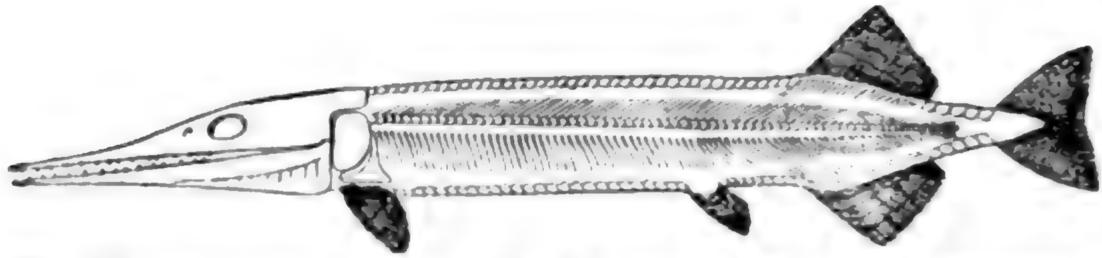


Fig. 48. †Belonorhynchus gigas A. Sm. Woodw. Verkleinerte Rekonstruktion von A. Sm. Woodward. Obertrias (?), Hawkesburyformation; NS-Wales. Aus Abel.

lassen sich 5 Unterordnungen in ihnen unterscheiden, deren phyletische Beziehungen untereinander allerdings nicht eindeutig feststehen.

1. Unterordnung. †Orthoganoidei, Koken (Lepidostei, Huxl. e. p., †Mesoganoidei, W. K. Greg.).

Echte rhombische Ganoidschuppen be-

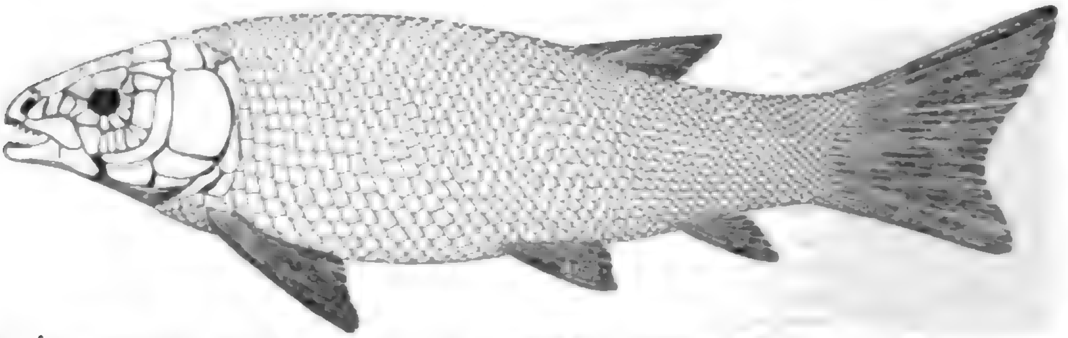


Fig. 49. †Lepidotus elvensis Blv. $^1/_3$ natürliche Größe. Oberlias, Posidonomyenschiefer: Holzmaden, Württemberg. Aus Jaekel.

decken den Körper; alle Flossen können Fulkrenbesatz haben; die Schwanzflosse ist innerlich stets scharf heterozerk, mit kurz beschupptem oberem Lappen, ihre äußere Form nähert sich ± weit der Homozerkie; die Wirbelsäule kann zu Halb- bis Ringwirbeln verknöchern. Perm bis Kreide.

†Acentrophorus Traq., ein winziges Fischchen aus dem Perm Englands (und aus der Trias?), ist der älteste bekannte Vertreter der wohl sicher auf heterozerke †Paläonisciden zurückzuführenden Fam. †Semionotidae (Perm-Lias), in der ± spindelförmige (†Semionotus Ag., Fig. 1, †Serrolepis Qu., †Crenilepis Dam. Trias) bis hochwüchsig werdende Fische (†Dapedius Ag. Obertrias, Lias; †Tetragonolepis Br. — von fast kreisförmigem Umriß und mit sehr hohen Schuppen auf den Flanken — Lias) vereinigt werden; ihre Schwanzflosse ist hinten wenig eingebuchtet bis gerade abgeschnitten; ihre Kiefer sind mit pitzigen Zähnchen besetzt (darum auch „Stylodontidae“ genannt); †Dollopterus Ab. aus dem Muschelkalk, mit mächtigen Brustflossen ist ein hierher gehörender Flugfisch. — Nächstverwandt ist die Fam. †Lepidotidae (Sphaerodontidae) aus Trias bis Kreide, mit einem Reibgebiß aus ± unregelmäßigen Reihen halbkugeliger Zahnkronen auf Gaumen, Oberkiefer und Unterkiefer und mit spitzigen bis schneidenden Zähnchen im Zwischenkiefer und auf den Kieferrändern (†Colobodus Ag., †Sargodon Plien. Trias; †Lepidotus Ag., Fig. 49, mit zahlreichen Arten, unter denen einzelne riesige, jungjurassische einen ungemein schweren Schuppenpanzer besitzen, Obertrias bis Unterkreide). — Meist schlank gestreckte Formen mit sehr langer, oft über den ganzen Rücken verlaufender Dorsalis, mit fast gleichlappiger Caudalis, mit ± reduzierten Fulkren, mit kräftigen schlanken Zähnen auf Gaumen, Vomer und Kiefern enthält die Fam. †Macrosemiidae, Trias bis Oberkreide (†Segnonotus Eg. Rhät; †Histionotus Eg., † Macrosemius Ag. mit dorsal und ventral reduzierter Beschuppung, †Ophiopsis Ag. Jura; †Petalopteryx Pict. Kreide). — Ebenfalls schlanke Rhombenschuppen, zum Teil mit hohen Schuppen auf den Flanken, doch mit kurzer Dorsalis, mit kleiner Analis, meist mit tief ausgeschnittener Caudalis, mit schwachen Fulkren und mit spitzigen Zähnchen umfaßt die Fam. †Pholidophoridae. Trias, Jura (†Pholidophorus Ag. Trias, Jura; †Pholidopleurus Br. Trias; †Pleuropholis Eg. Jura; die triadischen †Thoracopterus Br. und †Gigantopterus Ab., Fig. 50, waren nach ihren mächtigen Brustflossen Flugfische; †Archaeonemus A. Sm. W. Obertrias? hatte zykloidische Schuppen).

2. Unterordnung. †Pycnodonti, Jura bis Eozän.

Von den †Orthoganoidei (ob von den

Digitized by Google

†Lepidotidae?) sind wohl die durch ihre meist sehr hohe Körperform den †Platysomiden konvergenten †Pycnodonti abzuleiten: hohe, bei †Microdon hinten fehlende Rhombenschuppen bedecken die Flanken; Dorsalis und Analis werden zu langen Säumen, Pectoralis und Ventralis werden klein, ziemlich weit nach oben resp. vorn verlagert; der Operkularapparat wird reduziert, viele überzählige Deckplatten treten im Kopfskelett auf; die Gularplatte fehlt; ein Reibgebiß aus regelmäßigen Reihen ± ge-

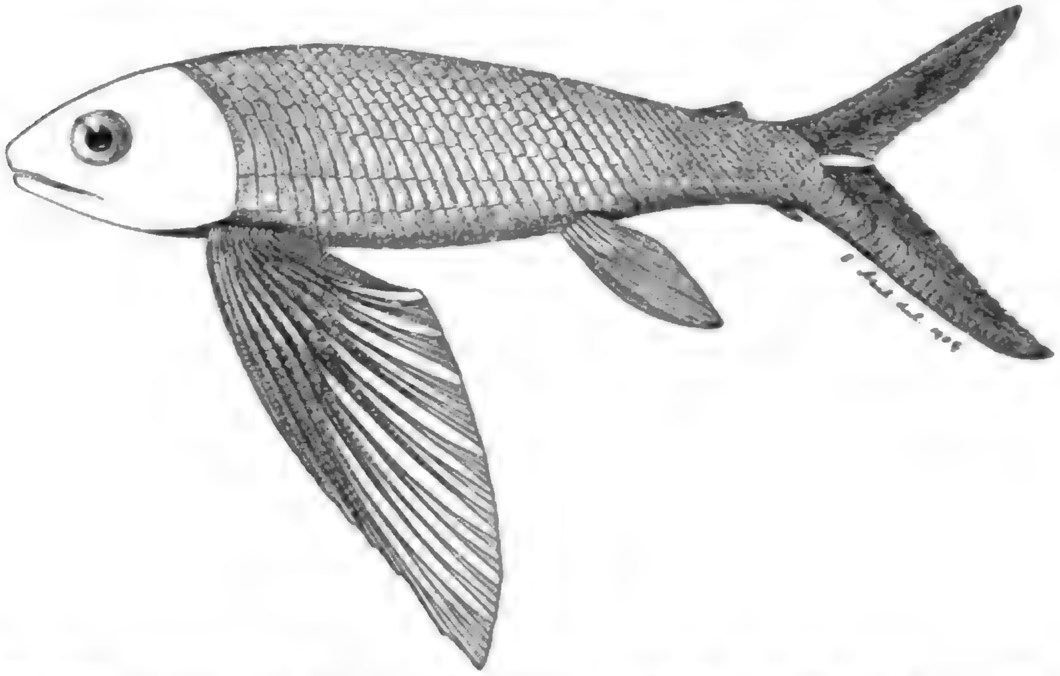


Fig. 50. †Thoracopterus Niederristi Bronn. Fossiler Flugfisch, Fam. †Pholidophoridae. Obertrias, Raiblerschichten; Raibl und Lunz, Oesterreich. Rekonstruktion von O. Abel.

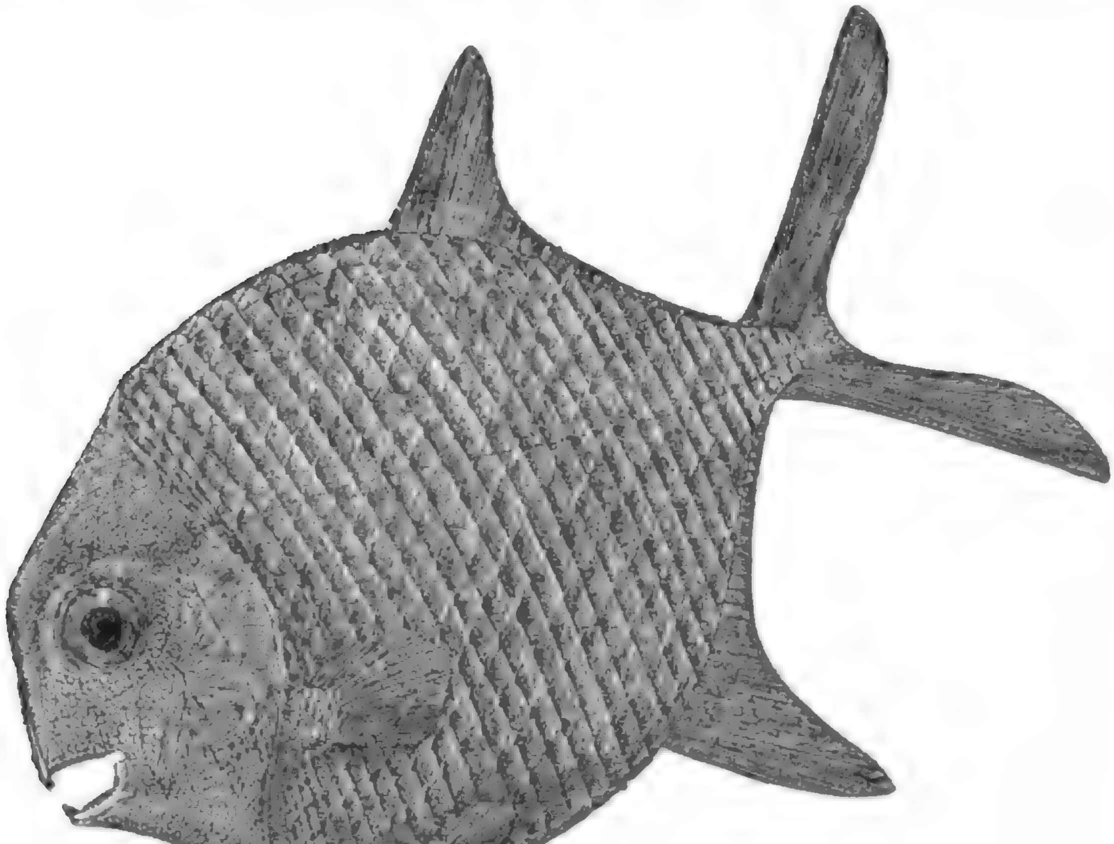


Fig. 51. †Gyrodus hexagonus Blv. sp. Rekonstruktion in Schwimmstellung nach P. Hennig; 1/3 natürlicher Größe. Oberster Jura, lithographischer Schiefer; Solnhofen, Bayern. Aus Jaekel.

Digitized by Google

runzelter Zähne sitzt dem Vomer und den Splenialia auf; wenige kegel- bis meißelförmige Zähne stehen vorn auf den kleinen Dentalia und Praemaxillen. Als Riffe abweidende Fische deutet Hennig die zum Teil sehr großwüchsigen Pycnodonten (†Gyrodus Ag., Fig. 51, †Microdon Ag., †Mesodon Wagn., †Mesturus Wagn., Jura; †Coelodus Heck., †Coccodus Pict., Kreide; †Pycnodus Ag., Eozän).

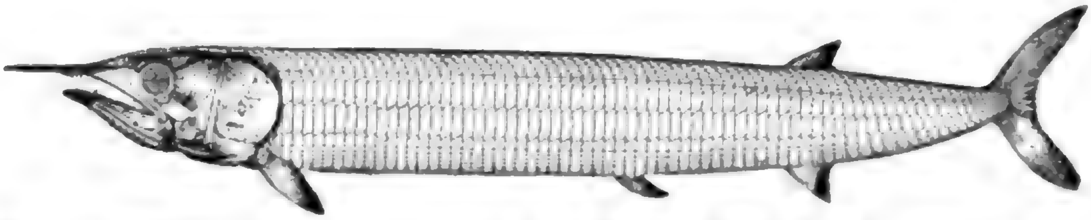


Fig. 52. †Aspidorhynchus acutirostris Ag. Rekonstruktion von P. Aßmann, 1/5 natürlicher Größe. Oberster Jura, lithographischer Schiefer; Solnhofen, Bayern. Aus Jaekel.

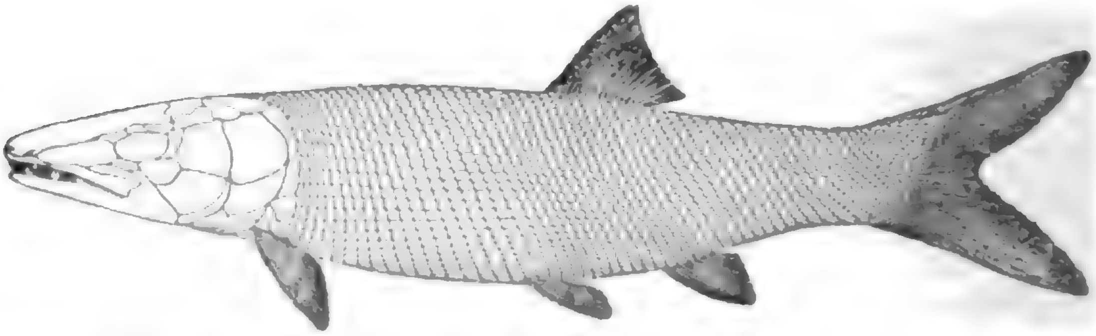


Fig. 53. †Eugnathus orthostomus Ag. Rekonstruktion von A. Sm. Woodward, ca. 1/4 natürlicher Größe. Unterlias; Dorsetshire, England. Aus Jaekel.

3. Unterordnung. †Aspidorhynchoidei; Jura, Kreide.

Vielleicht sind von den †Orthoganoiden auch die †Aspidorhynchiden abzuleiten: Sehr schlanke, in der Form den †Belonorhynchiden konvergente Fische mit wenigen Reihen hoher Schuppen auf den Flanken, mit viel niedrigeren am Rücken und Bauch, mit kleiner Dorsalis und Analis, mit tief ausgeschnittener, gleichlappiger Schwanzflosse; ohne Gularplatte. Der Schädel ist in eine langspitzige Schnauze ausgezogen; dem meist kürzeren Unterkiefer ist ein Praemandibulare eingefügt (†Aspidorhynchus Ag., Fig. 52, Jura, †Belonostomus Ag., Jura, Kreide).

4. Unterordnung. Amioidei.

Seit der oberen Trias gehen neben den †Orthoganoiden und ihren Derivaten die Amioidei her: Vorwiegend schlanke Raubfische mit kräftigem Hechelgebiß, deren Schuppen dünner, zykloidisch werden und deren Wirbelsäule mehr und mehr verknöchert. Die Schwanzflosse, innerlich heterozerk, wird äußerlich homozerk, hinten ausgeschnitten bis gerundet. Der Fulkrenbesatz der Flossen wird ± reduziert. Die Gularplatte bleibt erhalten. Vermutlich stehen die Amioideen den †Catopteridae (†Heterocerci) nahe und sind mit den übrigen Holostei gar nicht direkt genetisch verbunden.

Die Fam. †Eugnathidae (Trias bis Kreide) enthält die ursprünglichsten Amioideen mit Nackt- bis Halb- und Hohlwirbeln (†Ptycholepis Ag., Caturus Ag. Trias, Jura; †Eugnathus Ag., Fig. 53. †Eurycormus Ag. Jura; †Lophrostomus Eg. Kreide). — Mit den †Eugnathiden vom Lias bis in die Kreide vergesellschaftet und ihnen äußerlich wie im Bau der Wirbelsäule ähnlich ist die Fam. †Pachycormidae: Schlanke Raubfische, deren Vomer und Ethmoid zu einem Rostrum verlängert ist, mit sehr zahlreichen Branchiostegalien mit meist sehr hoher, hinten tief gebuchteter gleichlappiger Schwanzflosse und mit schlanken großen, groben Brustflossen. (†Pachycormus Ag., †Hypsocormus Wagn. Jura; †Protosphyraena Leid., Kreide, mit lang dornförmigem Rostrum, mit riesiger Pectoralis und Caudalis, deren vordere grobe Strahlen miteinander fest verwachsen, wurde häufig als Teleosteer aufgefaßt.) — Fam. Amiidae (Megaluridae) (Zoologischer Teil S. 1100) mit dünnen zykloidischen Schuppen; meist mit langer Dorsalis; mit innerlich heterozerker, hinten gerundeter Caudalis. Fulcra nur an den unpaaren Flossen oder ganz fehlend; Rumpf mit knöchernen, amphizölen Wirbelzentren, Schwanz mit Ringwirbeln, deren Hypo- und Pleurozentra noch nicht verwachsen sind (†Megalurus Ag., †Liodesmus Wagn. Jura; †Amiopsis Kner Kreide; Amia L. Tertiär, Jetzt). — Die Fam. †Oligopleuridae (Oberjura, Oberkreide) — mit vollständig verknöcherter Wirbelsäule, in der mit Ausnahme des ersten

Digitized by Google

Wirbels Hypo- und Pleurozentra nicht mehr getrennt sind; mit zykloidischen, dünnen Schuppen; mit hinten gebuchteter äußerlich homozerker Caudalis, mit schwachen Fulkren — also mit Formen, die fast vollständige Teleosteer sind, wird von manchen den †Orthoganoiden, von anderen den Amioideen zugerechnet (†Oligopleurus Thioll. Oberjura; †Oenoscopus Costa, Jura, Kreide; Spathiurus Dav. Kreide).

5. Unterordnung. Lepidosteoidei (Ginglymodi, Cope); s. Zoologischen Teil S. 1071, Fig. 26, S. 1100.

Die heute in Süßwässern Nord- und Zentralamerikas lebenden Knochenhechte mit rhombischen Ganoidschuppen, opisthozölen Wirbeln, mit weit verlängerter Schnauze, mit gerundeter, im wesentlichen durch Verlagerung der Analis 2 entstandener Schwanzflosse (Dollo) sind in einzelnen Resten (Lepidosteus Lac; †Clastes Cope) seit dem Eozän bekannt; ihre Stellung zu den übrigen Ganoiden ist ungeklärt.

Bionomie der Ganoiden. Von den wenigen rezenten Ganoiden sind Amia in Nordamerika, Lepidosteus in Nord- und Zentralamerika, die Löffelstöre Polyodon in Nordamerika, Psephurus in China, der Stör Scaphirhynchus in Nordamerika und China, Süßwasserbewohner, während die Accipenser-Arten sowohl in den Meeren wie Süßwässern der Nordhemisphäre zu Hause sind. Aus der Vorzeit ist wohl die überwiegende Menge der Ganoiden aus marinen Ablagerungen bekannt. Aus diesen Momenten wird gewöhnlich der Schluß gezogen: die lebenden Ganoiden sind in die kontinentalen Gewässer gedrängte Nachkommen mariner Typen der Vorzeit. Der Schluß ist jedenfalls nicht unbedingt richtig. Die Wohnsitze der ältesten Ganoiden (†Cheirolepis) waren ausschließlich, die der übrigen paläozoischen und der triadischen Formen ganz vorwiegend Wässer kontinentaler Gebiete, teils auch Binnenmeere, in denen aber die Ganoiden sicher nicht autochthon waren (Meer des Kupferschiefers!). Erst im Jura scheint reichlichere, aber nicht vollständige Abwanderung in die Meere Platz gegriffen zu haben. Sehr wahrscheinlich sind die heute lebenden Formen mit ihren ganz unvollständig bekannten Stammbäumen solche, deren Ahnen mehr oder weniger dauernd an kontinentale Gewässer gebunden waren. Die recht sehr lückenhafte Geschichte der Ganoidenstämme überhaupt würde ihre Erklärung darin finden, daß die eigentliche Entfaltung der Ganoiden sich in Kontinentalgebieten vollzog.

2. Ordnung. Teleostei, Knochenfische. Die Geschichte der in gewaltiger, durch jede neue Expedition vermehrter Formenfülle die heutigen Meere und Süßwässer bevölkernden Knochenfische (Zoologischer Teil, S. 1100—1104) zu verfolgen, gebricht es an Raum, aber auch an genügend vollständigem und sicherem Material.

Es sei hervorgehoben, daß im Bereich der Ganoiden verschiedentliche Umprägungen nach der Richtung der Teleosteer vorkamen, so bei den †Pholidophoriden, in den †Oligopleuriden, Amiiden, daß andererseits bei sonst echten Knochenfischen (Malacopterygiern), den †Leptolepiden des Jura die Zykloidschuppen noch einen deutlichen Ganoidbelag besitzen. Die Grenzen zwischen beiden Teleostomentypen sind, besonders auf Grund des fossilen Materials, keineswegs scharfe, — doch bestimmte genetische Linien von den Ganoiden zu den Teleosteern zu ziehen, ist heute noch nicht angängig.

Weiter als bis in den unteren Jura lassen sich die Teleosteer, (neben den Holocephalen?) der jugendlichste der Fischstämme, nicht zurückverfolgen. Hier ist es die Unterordnung Malacopterygii, welche zuerst auftritt: die weitverbreiteten †Leptolepidae, nahe verwandt mit den seit der Unterkreide bekannten Clupeidae. In größerer Zahl treten dazu in der Kreide die Elopidae, Albulidae, Saurodontidae, Ctenotrissidae, die mächtigen Raubfischformen der †Ichthyodectidae. In der Kreide, besonders in der oberen, sind dann bereits mehrere andere Unterordnungen vertreten: die Haplomi, Heteromi, die Percesoces und die Acanthopterygii. Im Alttertiär tauchen die ersten Ostariophysi auf und die Symbranchii, Apodes, Catosteomi, die Anacanthini, die Pediculati und Plectognathi. Seit dem Jungtertiär hat die Teleosteerfauna — abgesehen von geographischen Verschiebungen — keine irgendwie wesentliche Umprägung erfahren.

3. Geschichte, geologische Verbreitung und Bedeutung der Fische. Bei seinem ersten noch spärlichen Bekanntwerden im jüngeren Obersilur[1]) zeigt der Fischstamm bereits die vollkommen scharfe Scheidung in †Placodermi und Elasmobranchii (und auch Dipnoi?). Wesentlich größer ist dann die Differenzierung der ältesten devonischen Fische: Cyclostomi?, †Arthrodira, Dipnoi, Crossopterygii, Ganoidei treten hinzu. Mögen auch einzelne anatomische Merkmale auf eine ursprüngliche Einheit von Elasmobranchiern, Dipnoern, Crossopterygiern, Ganoiden hindeuten, das fossile Material zeigt uns alle verschiedenen Unterstämme unvermittelt nebeneinander, und lediglich das spätere Werden von Rochen aus Haien, von Teleosteern aus Ganoiden erscheint paläontologisch genügend verbürgt.

---

[1]) Abgesehen von den Haizähnchen †Palaeodus im Tremadoc Rußlands und von den fraglich untersilurischen (?devonischen) Resten von Canyon City, Col.

Zeitliche Verbreitung der Fische	Kambrium	Unter-Silur	Ober-Silur	Unter-Devon	Mittel-Devon	Ober-Devon	Karbon	Perm	Trias	Jura	Kreide	Tertiär	Quartär
A. Cyclostomi, S. 1109				?			?						—
B. †Placodermi, S. 1110			—	—	—	—							
†Anaspida, S. 1111			—										
†Heterostraci, S. 1112			—	—	—								
†Osteostraci, S. 1113			—	—	—								
†Antiarchi, S. 1115		?		—	—	—							
C. †Arthrodira, S. 1117				—	—	—							
D. Elasmobranchii, S. 1120		?	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
†Acanthodi, S. 1120			—	—	—	—	—	—					
†Ichthyotomi, S. 1121						—	—	—	?				
Plagiostomi, S. 1123							—	—	—	—	—	—	—
Holocephali, S. 1131							?	?		—	—	—	—
E. Dipnoi, S. 1133			?	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
F. Teleostomi, S. 1135				—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Crossopterygii, S. 1135		?		—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Actinopterygii, S. 1138													
Ganoidei, S. 1139				—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Teleostei, S. 1145									?	—	—	—	—

Die weitgehende Differenzierung des Fischstammes schon in den ältesten Fischfaunen drängt zu dem Schluß: Diese als älteste bekannten verschiedenen Fischtypen sind bereits sehr weit vom Ursprung der Fische entfernt; es muß eine sehr lange uns unbekannte Vorgeschichte des Fischstammes angenommen werden. Wie ist das zu erklären? Wo spielte sich die Vorgeschichte der Fische ab? Gewöhnlich wird, wie für ältestes Leben überhaupt, der Anfang der Fische im Meere gedacht. Dann ist es auffallend, daß in Sedimenten kambrischer und bis weit ins Obersilur reichender Meere nichts (Wesentliches) von Fischen gefunden ist. Das ist um so auffallender, als bei den sehr vielartigen Fazies der Marinbildungen jener Zeiten Gesteine genug bekannt sind, in welchen Fische sehr wohl erhalten sein könnten, selbst wenn sie Hartgebilde nur in geringfügigstem Maße besessen hätten.[1]) Nur eine Erklärung ist möglich: Die Heimat der ersten Fische war nicht das Meer, sondern das Land, die Gewässer alter Kontinente.[2]) Beweis: das geologische Vorkommen der ältesten Fischreste. Die Bonebeds mit Fischresten im Ludlow des englischen Obersilur, die Fische-Skorpione-†Gigantostrakenführenden Ablagerungen des Obersilur von Lanarkshire und der Pentlandhills von Schottland, die fischführenden Gesteine des Obersilur Podoliens, des polnischen Mittelgebirges, Gotlands, von Oesel, Nordamerikas, von Portugal sind zum Teil nicht mehr rein marine Bildungen, stets aber solche größter Landnähe, und zwar der großen, alten, im Obersilur anwachsenden kanadisch-nordatlantisch-fennoskandischen Kontinentalmasse und der alten iberischen Meseta. Dort, in Landgewässern (deren Sedimente uns nicht erhalten sind) heimische Fische wurden wohl unter dem Einfluß der im jüngeren Obersilur vorbereiteten „kaledonischen" Gebirgsfaltung in Randgebiete der Meere und in mehr oder weniger abgeschnürte, brackisch werdende Becken gedrängt, zum Teil wohl einfach ins Meer geschwemmt.[3])

[1]) Man denke an die Burgess-shales des Mittelkambriums von Britisch Kolumbia, in denen Walcott die zartesten Details von Anneliden, Chaetognathen, Holothurien, Medusen, Phyllopoden erkannte, oder an die Graptolithenschiefer, in welchen auch zarteste Fischreste wie in petrographisch analogen marinen Gesteinen späterer Zeiten erhaltbar gewesen wären.

[2]) Nicht, daß ich meine, die Ahnen der Fische müßten vierfüßige Kriechtiere des Landes gewesen sein (vgl. Simroth).

[3]) Der russische Glaukonitsand mit †Palaeodus ist eine Küstenbildung des Tremadocmeeres; sein Gesteinsmaterial entstammt dem Lande Fennoskandia, von dort wurde es und mit ihm wohl auch die Fischzähnchen dem Meere zugeschwemmt.

Digitized by Google

Sind die Fischreste von Canyon City, Col. wirklich untersilurischen Alters, dann bedeutet die ganze Art ihres Vorkommens die Existenz eines silurischen Landes von Oldredcharakter an dessen Küste (Brachiopoden, Cephalopoden bezeugen marinen Einschlag) das rote, fischführende Gestein aus terrigenem Material aufgehäuft wurde.

Das in den kontinentalen Bildungen der Oldredfazies reichlichere Vorkommen von Fischen als im marinen Devon spricht in gleichem Sinne. Noch waren die Fische in den Meeren nicht heimisch geworden. Mehr und mehr wurden sie es erst im Karbon und Perm; aber auch damals blieb noch ein Teil der Haie (†Acanthodi, †Ichthyotomi e. p., Plagiostomi e. p.), die meisten Dipnoer, Crossopterygier, viele Ganoiden in den Wässern des Landes.[1] Eigentlich erst vom Mesozoikum ab — besonders seit dem Jura, als durch die Teleosteer, die Rochen (und Holocephalen), durch zahlreichere neue Haitypen die „Modernisierung" der Fische einsetzte — ist reichlicheres Abwandern von Fischen in die Meere verbürgt: Die Plagiostomen,[2] Holocephalen, ein Teil der Crossopterygier, zahlreiche Ganoiden, die Teleosteer des Jura sind wenigstens nur aus Marinablagerungen bekannt. Dabei dürften für die direkten Vorfahren der heute lebenden Dipnoer, Crossopterygier und Ganoiden die Gewässer der Landfesten dauernd die Wohnsitze geblieben sein.

Mit der geologisch zu begründenden Annahme, daß die Urentwickelung der Fische in Landgebieten vor sich ging, fällt die — übrigens morphologisch nicht zu stützende — Ansicht Pattens, Steinmanns u. a., die Fische seien aus den marinen †Trilobiten hervorgegangen (vgl. den Artikel „Crustacea", Bd. II, S. 772—788). Leider vermag aber das fossile Material keinen positiven Aufschluß über die Abstammung der Fische zu geben; sie stehen allen Evertebraten gegenüber unvermittelt da (ebenso aber auch den übrigen Vertebraten, vgl. d. Artikel „†Stegocephalen").

Ebensowenig löst das Fossilmaterial die Frage nach dem Ursprung der paarigen Flossen. Manches, die Flossen der †Diplacanthiden, des oberdevonischen Haies †Cladoselache, läßt sich sehr wohl für das Werden der paarigen Flossen aus Seitenfalten verwerten (Balfour, Thacher, Mivart, Wiedersheim u. a), und †Cladoselache läßt auch erkennen, wie etwa aus dem „Pleuro- oder Ptychopterygium" das biseriale „Archipterygium der Dipnoer und Crossopterygier (das allerdings schon im Unterdevon fertig vorhanden gewesen sein muß) und aus diesem das „Actinopterygium" der Ganoiden und Teleosteer, auf der anderen Seite die paarigen Flossen der Elasmobranchier werden oder geworden sein könnten.

[1]) Solche Formen, wie z. B. †Janassa, †Menaspis (S. 1129) des Kupferschiefers im Perm erscheinen nach ihrem Bau unter Berücksichtigung der physikalischen und chemischen Verhältnisse des Kupferschiefermeeres durchaus als Fremdlinge, die nur aus Kontinentalwässern verschwemmt sein können.

[2]) Aber es sei betont, daß die Haie auch heute nicht ausschließliche Meeresbewohner sind.

Ueberraschend ist das Fehlen paariger Flossen bei den †Placodermen. Zum Teil brauchten sie solche nicht dank ihrer niedergedrückten Form mit seitlichen Randsäumen (†Heterostraci, †Osteostraci), aber auch den schlank spindelförmigen †Anaspida des Obersilur fehlen diese wichtigsten Mittel zur Erhaltung des Gleichgewichts beim Schwimmen, sie besaßen dazu nur eine kleine, dorsale oder ventrale Medianflosse. Sind diese — sehr alten — Formen hierin primitiv oder degeneriert?

Alle ältesten Fischtypen besitzen eine heterozerke Schwanzflosse (Ausnahme: †Palaeospondylus) von epibatischer Funktion (? mit Ausnahme der †Anaspida): sie müssen darum vorwiegend an die Tiefen der Gewässer gebunden gewesen sein, oder es wog bei ihnen der Zwang zum Abwärtssteigen vor. Auf diese heterozerk-epibatische Schwanzflosse (die vielleicht aus einem diphyzerken Saum hervorging?) sind alle übrigen, durch verschiedene Anpassungsvorgänge modifizierten Schwanzflossenformen zurückzuführen.

In der Geschichte des Fischstammes, die vollständig zu schreiben das höchst lückenhafte, fossile Material (das meiste stammt nur aus Europa und Nordamerika) nicht erlaubt, fallen einzelne Zeiten in besonderer Weise auf: Mit der Grenzzeit Devon-Karbon verschwinden die †Phacodermen und †Arthrodiren, die Blütezeit der Dipnoer und Crossopterygier ist vorüber; die ersten echten Haie erscheinen und die Ganoiden blühen auf. Mit der Grenzzeit Perm-Trias verschwinden die altertümlichen der Plagiostomen, und in den Zeiten von Jura und Kreide spielt sich der — immer energischer werdende — Ersatz der Ganoiden durch die seit dem Tertiär neben den Haien weit vorherrschenden Teleosteer ab.

Geologisch besonders wichtig sind namentlich die devonischen †Placodermi und †Arthrodira als die vorwiegendsten Charakteristika der Faunen der Oldredfazies. In späteren Formationen lassen sich manche Fischfaunen (z. B. im Kupferschiefer des Perm, in den Posidonomyenschiefern des Lias, in manchen Kreide- und Tertiärablagerungen) zur Deutung bionomischer Verhältnisse einzelner Gebiete der Vorzeit verwerten. Manche Vorkommnisse, wie die der triadischen Dipnoer und Ganoiden sind von Bedeutung für die Feststellung von einstigen Zusammenhängen alter Kontinentalgebiete.

Literatur. *Zusammenstellungen in* ***K. A. v. Zittel,*** *Grundzüge der Paläontologie. Abt. II: Vertebrata (Bearbeitung der Fische von E. Koken), 1911. —* ***E. Stromer v. Reichenbach,*** *Lehrbuch der Paläozoologie,* **2**, *1912. —* ***E. G. Goodrich,*** *Vertebrata Craniata,* **1** *(in Ray Lankester, Treatise on Zoology, P. IX), 1909.*

J. F. Pompeckj.

Fittig
Rudolf.

Geboren am 6. Dezember 1835 in Hamburg, gestorben am 19. November 1910 in Straßburg, war von 1876 bis 1902 als Universitätsprofessor

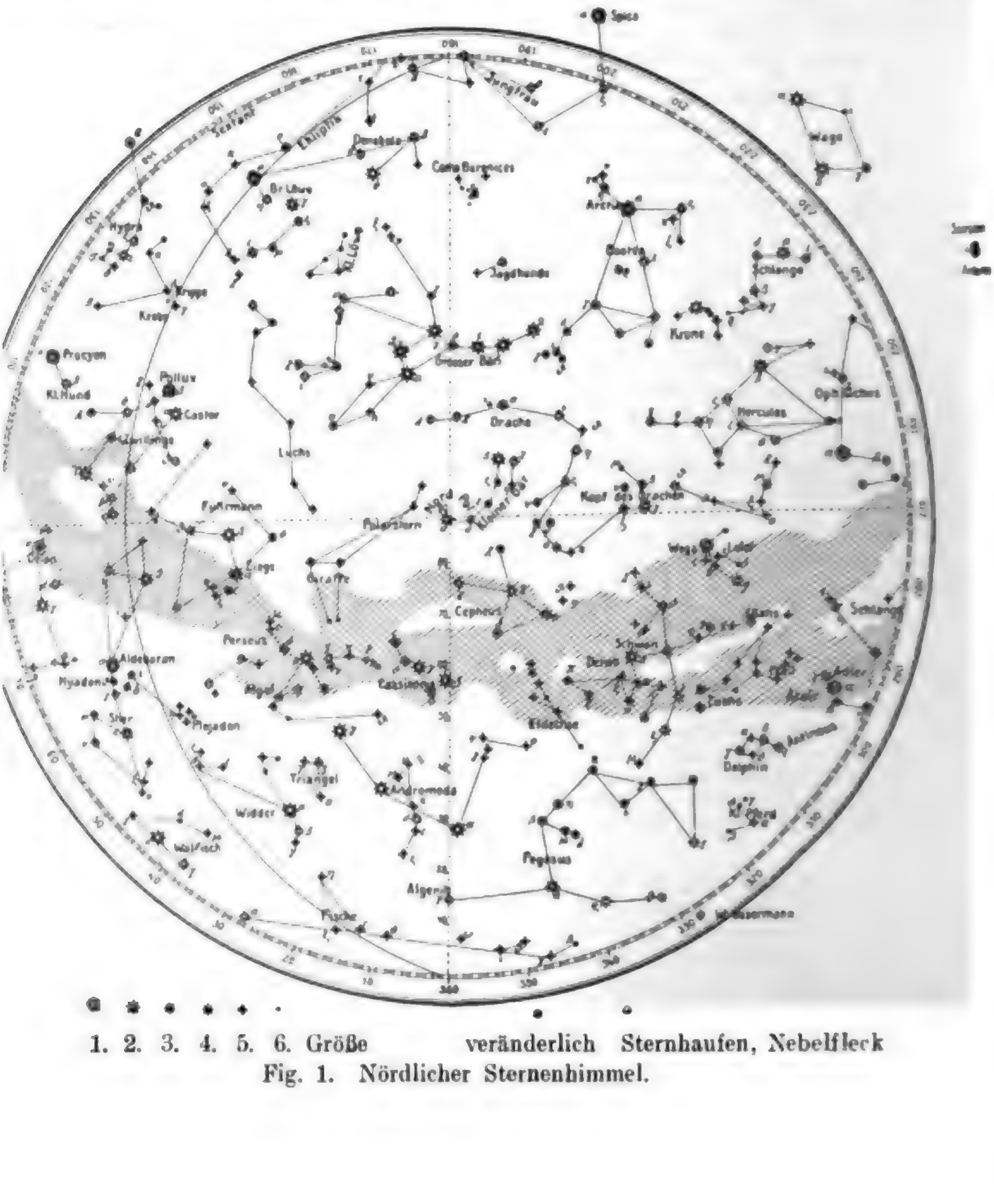
Digitized by Google

ßem Erfolge tätig, nachdem er in Göt-
ds Schüler Wöhlers seine akademische
n 1860 begonnen und in Tübingen 1870
zt hatte. Seine Hauptleistungen sind in
ten Abhandlungen niedergelegt, die er
lein, teils mit Schülern veröffentlicht
e finden sich meist in Liebigs Annalen
den Berichten der Deutschen Chemischen
haft, sind auch in dem von seinem Schüler
geschriebenen Nekrolog (Ber. 44, 1339)
g zusammengestellt. Hier gewinnt man
nblick in Fittigs Wesen und Wirken.
hwerpunkt seiner Tätigkeit liegt im
orium. Seine Experimentaluntersuchungen
ar der organischen Chemie, die er zunächst
che der zyklischen Verbindungen mächtig
t hat. Es seien seine synthetischen Ar-
ber die Homologen des Benzols, über eine
neuer Kohlenwasserstoffe, namentlich
hren, Fluoranthren und Diphenyl heraus-
. In die letzten zwei Jahrzehnte seiner
t fallen die schönen, umfassenden Unter-
en über ungesättigte Säuren, durch deren
he Erforschung Fittig zu den wichtigsten Ergebnissen geführt wurde, so zu seinen Arbeiten über Stereoisomerie und zu den Umlagerungen solcher Säuren, über Laktone und Dilaktone, sowie über Ketonsäuren.

E. von Meyer.

Fixsternsystem.

1. Definition. 2. Der Sternenhimmel: a) Einteilung in Sternbilder; Bezeichnung der Sternbilder und einzelner Sterne. b) Einteilung der Sterne in Größenklassen. c) Verteilung der Sterne an der Himmelskugel; Milchstraße. d) Die Koordinatensysteme zur Angabe des Sternortes. e) Lagenänderung der Koordinatensysteme durch die Präzession. 3. Ort und Bewegung der Sterne im Raum: a) Entfernung der Sterne; ihre Parallaxe. b) Aberration. c) Bewegung senkrecht zur Gesichtslinie. d) Bewegung in der Gesichtslinie. 4. Chemisch-



1. 2. 3. 4. 5. 6. Größe veränderlich Sternhaufen, Nebelfleck

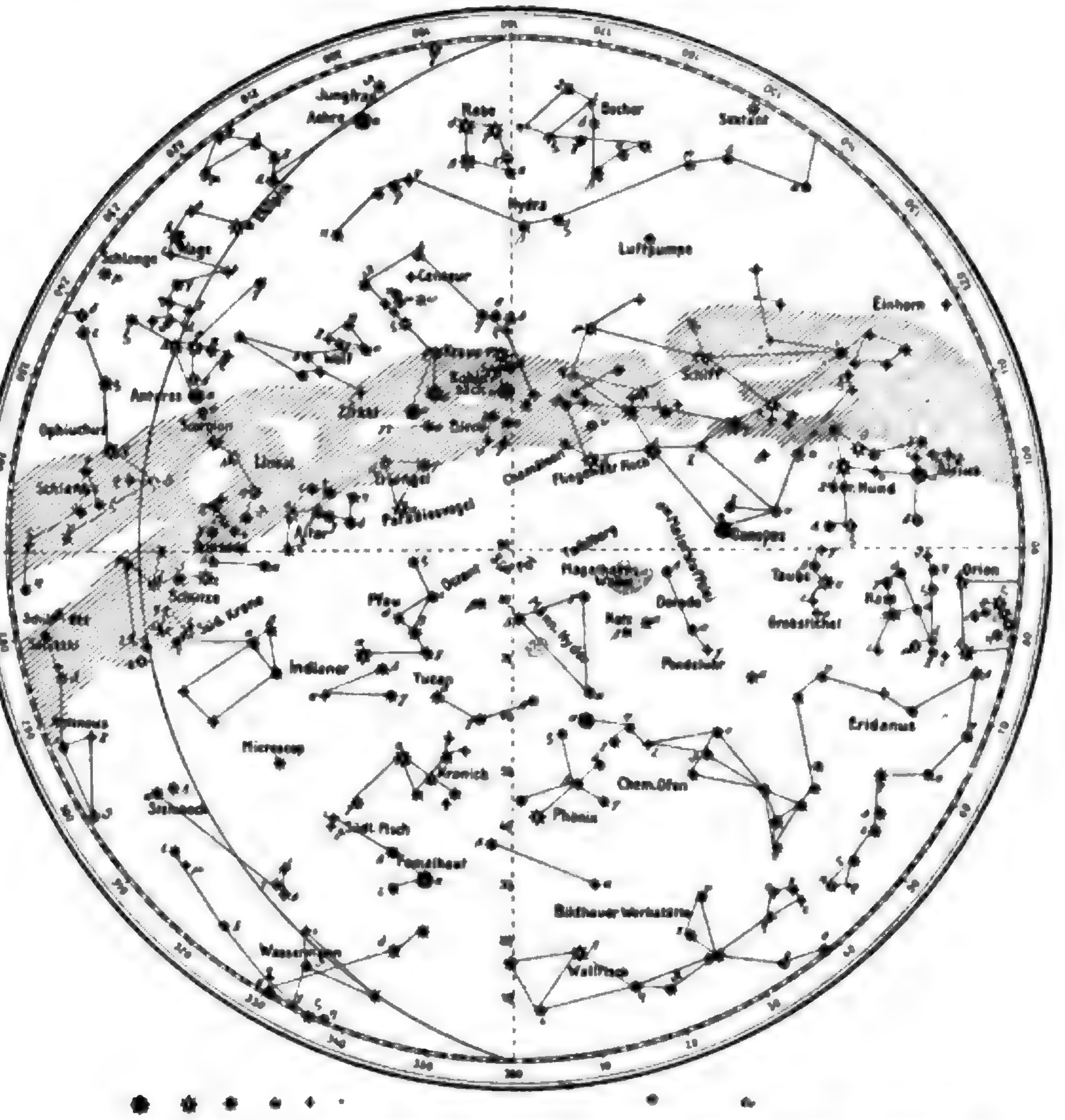
Fig. 1. Nördlicher Sternenhimmel.

physikalisches Verhalten der Sterne: a) Einteilung der Sterne nach ihren Spektren. b) Farbe der Sterne. c) Temperatur der Sterne. d) Veränderliche Sterne. e) Neue Sterne. 5. Physisch zusammengehörige Sterne: a) Doppelsterne und mehrfache Sterne. b) Sternhaufen; Gruppen weit auseinander stehender Sterne. c) Nebel. 6. Bau des Universums.

1. Definition. Unter dem Fixsternsystem versteht man die Gesamtheit der an der scheinbaren Himmelskugel ihren Ort nicht ändernden Sterne im Gegensatz zu den von Tag zu Tag ihren Ort ändernden Wandelsternen, d. i. den Planeten mit ihren Monden und den Kometen.

Infolge der Drehung der Erde um ihre Achse von West nach Ost scheinen die Fixsterne im Laufe eines Tages eine Umdrehung von Ost nach West auszuführen. Die Achse, um welche sich das Himmelsgewölbe zu drehen scheint, fällt zusammen mit der verlängert gedachten Erdachse. Sie trifft die Himmelskugel im Nordpol und Südpol, von denen der erstere etwas über 1° von *α Ursae minoris*, dem sogenannten Polarstern, abliegt, während der letztere in das Sternbild des *Oktanten* fällt, welches keinen leicht in die Augen fallenden Stern besitzt. Die Fixsterne erscheinen, wie ihr Name besagt, an der sich scheinbar drehenden Himmelskugel angeheftet, so daß die Figuren, welche gewisse Sterne miteinander bilden, immer dieselben bleiben. Ueber die geringfügige Ortsveränderung durch Eigenbewegung s. unter 3c.

2. Der Sternenhimmel. 2a) Einteilung in Sternbilder; Bezeichnung der Sternbilder und einzelner Sterne. Besonders auf Grund mythologischer Sagen hat man schon im Altertum benachbarte Sterne zu Sternbildern zusammengefaßt. Für den in der nördlichen gemäßigten Zone nicht sichtbaren



1. 2. 3. 4. 5. 6. Größe veränderlich Sternhaufen, Nebelfleck

Fig. 2. Südlicher Sternenhimmel.

Digitized by Google

Teil des Südhimmels hat namentlich Lacaille (1713 bis 1762) gelegentlich seines Aufenthalts am Kap der guten Hoffnung die Einteilung in Sternbilder besorgt, wobei er, wie die auf der beistehenden Karte des südlichen Sternenhimmels angegebenen Namen beweisen, wenig Geschmack und poetischen Sinn entwickelte. Für die besonders hellen Sterne sind lateinische, griechische und hauptsächlich arabische Namen im Gebrauch. Bayer (1572 bis 1625, Rechtsanwalt in Augsburg) führte die Bezeichnung durch griechische und lateinische Buchstaben mit Hinzufügung des Sternbildes ein; die schwächeren, mit bloßem Auge noch sichtbaren Sterne eines Sternbildes, welche keine Buchstaben mehr erhalten konnten, sind von Flamsteed (1646 bis 1719, Direktor der Greenwicher Sternwarte) mit Zahlen versehen worden. Zur Bezeichnung eines teleskopischen Sternes bedient man sich, wenn er in einem Sternkatalog vorkommt, der Nummer, unter welcher er dort aufgeführt ist, oder, wenn er noch nirgends katalogisiert ist, der Angabe seines Ortes an der Himmelskugel (s. unter 2d).

2b) Einteilung der Sterne in Größenklassen. Nach ihrer Helligkeit teilt man die Sterne schon seit den Zeiten der alten Griechen in verschiedene Größenklassen, so daß man die hellsten Sterne als solche 1. Größe, die in mondlosen Nächten mit bloßen Augen gerade noch erkennbaren als Sterne 6. Größe bezeichnet. Nach Erfindung des Fernrohres wurde die Einteilung in Größenklassen auch auf die teleskopischen Sterne ausgedehnt, in besonders großem Maßstab und mit besonderer Zuverlässigkeit der Schätzungen von Argelander (1799 bis 1875, Direktor der Sternwarte zu Bonn) und seinen Gehilfen Schoenfeld (1828 bis 1891, zuletzt Direktor der Sternwarte zu Bonn) und Krueger (1832 bis 1896, zuletzt Direktor der Sternwarte zu Kiel) bei Herstellung der Bonner Durchmusterung des nördlichen Himmels, die von Schoenfeld später bis 23° südlicher Deklination fortgesetzt wurde, so daß in dem Gesamtwerk von über 450000 Sternen Helligkeitsschätzungen nach sehr einheitlichem System vorliegen.

Photometrische Untersuchungen haben ergeben, daß das Helligkeitsverhältnis der Sterne zweier aufeinander folgender Größenklassen 2,512 ist, d. h. ein Stern irgendeiner Größenklasse sendet 2,512mal soviel Licht aus als ein Stern der nächsten Größenklasse. Nur die erste Größenklasse macht hier eine Ausnahme, indem man in sie alle Sterne, die heller als 2. Größe sind, hineingebracht hat. Bei genauen Größenangaben ist man genötigt, unter Beibehaltung des Helligkeitsverhältnisses 2,512 die Größe der hellsten Sterne durch negative Zahlen auszudrücken; so ist die Größe von *Sirius* gleich — 1,7 und von dem nur in südlicheren Breiten sichtbaren *Canopus* gleich — 1,0. Für die Sonne hat man die Größe — 26,5 gefunden.

Von den zahlreichen Photometern, welche es gibt, sind für große Sternhelligkeitskataloge nur drei benutzt worden, nämlich von Pickering (Direktor der Harvard-Sternwarte in Cambridge, Mass.) für die Harvard Photometry das Meridianphotometer, bei welchem in zwei mit gleichen Objektiven versehene, in der Ostwestrichtung horizontal liegende Rohre durch zwei unter 45° gegen die Fernrohrachse geneigte Spiegel der den Meridian gerade passierende, zu untersuchende Stern und der polnahe Vergleichstern, bei Pickering *λ Ursae minoris*, reflektiert werden, worauf durch Anwendung eines Nicols und eines doppeltbrechenden achromatisierten Kalkspatprismas die beiden Sternbilder auf gleiche Helligkeit gebracht werden; ferner ist benutzt worden von Pritchard (1809 bis 1893, Direktor der Universitätssternwarte in Oxford) für die Uranometria nova Oxoniensis das aus einem keilförmigen Stück Rauchglas bestehende Keilphotometer, das vor dem Okular so weit seitlich verschoben wird, bis der zu prüfende Stern gerade unsichtbar wird; und endlich von Müller und Kempf auf dem Astrophysikalischen Observatorium in Potsdam für die Potsdamer Durchmusterung des nördlichen Himmels das von Zöllner (1834 bis 1882, Professor der physikalischen Astronomie in Leipzig) erfundene, nach ihm benannte Photometer, bei dem der Vergleichstern durch eine künstliche Lichtquelle erzeugt und durch Polarisationsprismen mit dem zu untersuchenden Stern auf gleiche Helligkeit gebracht wird.

Die von der photographischen Platte entnommenen Sterngrößen, welche meist durch Ausmessung der Durchmesser der Sternbildchen erhalten werden, können von den visuell gefundenen oft bedeutend abweichen, weil bei der Erzeugung des photographischen Bildes ganz andere Strahlen wirksam sind als bei der Erzeugung des visuellen Bildes. Bezeichnet man mit m_1 und m_2 die Größenklassen zweier Sterne, mit D_1 und D_2 die Durchmesser ihrer photographischen Bilder und mit α und β Werte, welche für dieselbe photographische Platte konstant sind, so ist nach Charlier (Direktor der Sternwarte in Lund) $m_1 - m_2 = \alpha(\log D_2 - \log D_1)$ und nach Scheiner (Hauptobservator am Astrophysikalischen Observatorium in Potsdam) für nicht allzu große Helligkeitsdifferenzen $m_1 - m_2 = \beta(D_2 - D_1)$, welche beide Formeln übrigens nur als Interpolationsformeln ohne physi-

Digitized by Google

kalische Bedeutung aufzufassen sind. Am besten wird man die weißen, dem ersten Spektraltypus angehörenden Sterne benutzen, um die Konstanten α und β zu bestimmen. Sterne vom III. Typus (s. unter 4a) pflegen dann wegen ihrer rötlichen Farbe freilich im Durchschnitt photographisch um 2,5 Größenklassen schwächer gefunden zu werden als visuell.

2c) Verteilung der Sterne an der Himmelskugel; Milchstraße. Die Verteilung der Sterne an der Himmelskugel ist eine sehr ungleiche. Während gewisse Stellen nicht nur an hellen, sondern auch an teleskopischen Sternen arm sind, sind andere Stellen außerordentlich reich besetzt, so besonders das aus zahllosen kleinen, für das unbewaffnete Auge nicht unterscheidbaren Sternen bestehende, die ganze Himmelskugel umspannende Band, die Milchstraße. Sie schlingt sich zwischen *Orion* und den *Zwillingen* hindurch nach dem *Fuhrmann* und dem *Perseus*, wo sie einen Zweig nach den *Plejaden* und *Hyaden* sendet; dann wendet sie sich nach der *Cassiopeia* und dem *Schwan*, hier eine ganz besondere Helligkeit entfaltend. In zwei Aeste geteilt zieht sie sich nunmehr nach Süden, wo beim *Skorpion* und *Schützen* die Wiedervereinigung der beiden Aeste stattfindet. Im *südlichen Kreuz* und im *Schiff* hat die Milchstraße wieder besonders helle Stellen, gegen welche die benachbarten, auffallend sternarmen Stellen, die Kohlensäcke, durch ihre Dunkelheit stark abstechen. Auch auf der südlichen Halbkugel hat die Milchstraße mehrere Ausläufer; zwei als Magelhaenssche Wolken bezeichnete, dem Aussehen nach ihr durchaus angehörige Teilstücke liegen weit von ihr getrennt. Vom *Schiff* aus wendet sie sich wieder nach Norden auf das Sternbild der *Zwillinge* zu.

Die Zahl aller Sterne bis einschließlich der 6. Größenklasse, also aller mit bloßen Augen sichtbaren Sterne beträgt 5719, wovon 2916 auf die nördliche, 2803 auf die südliche Halbkugel des Himmels entfallen. Die Zahl der Sterne wächst aber stark von einer Größenklasse zur anderen; so ist die Zahl der Sterne der nördlichen Halbkugel bis zur 9. Größe nach der Bonner Durchmusterung bereits 203 649. Wollten wir annehmen, der Raum sei bis ins Unendliche mit Sternen besetzt und das Licht erfahre bei der Durchdringung des Raumes keine Absorption, so müßte, wie Olbers (1758 bis 1840, Arzt und Astronom in Bremen) hervorhob, der nächtliche Himmel uns als eine leuchtende Fläche erscheinen. Vermutlich erfährt aber das Licht im Weltenraum eine Absorption und wird auch wohl bisweilen durch dunkle Körper abgefangen, namentlich aber dürfte sich das Sternenmeer nicht ins Unendliche erstrecken, wir werden es vielmehr mit einer endlichen Zahl von Sternen zu tun haben. Die Zahl Hundert Millionen ist aber, wie uns die photographischen Aufnahmen lehren, wohl nicht zu hoch gegriffen, und außer den leuchtenden Sternen mag es nicht weniger dunkle, erloschene Himmelskörper geben. Figur 3 zeigt eine allerdings sehr sternreiche Gegend im Sternbild des Schlangenträgers. Bei längerer Exposition oder bei größerer Empfindlichkeit der Platte würden sich gewiß noch mehr Sterne abgebildet haben.

2d) Die Koordinatensysteme zur Angabe des Sternortes. Zur Angabe eines Sternortes bedient man sich meist der Koordinaten: Rektaszension und Deklination, welche den für die Bezeichnung eines Ortes auf der Erde üblichen Koordinaten: geographische Länge und Breite entsprechen. Die Kreise, welche durch die beiden Pole der Himmelskugel gehen, heißen Meridiane oder, weil auf ihnen die Deklinationen gemessen werden, Deklinationskreise, der um 90° von den Polen abstehende Kreis der Himmelsäquator und parallel zu diesem liegende Kreise Parallelkreise. Unter Deklination versteht man den Winkelabstand eines Sternes vom Aequator, wobei man nördliche und südliche Deklination unterscheidet, die als positive und negative bezeichnet zu werden pflegen. Die Rektaszensionen werden — wie die geographischen Längen auf der Erdkugel — auf dem Aequator gemessen und zwar von West nach Ost von 0 bis 360 Grad, also von Norden aus gesehen entgegengesetzt dem Laufe des Uhrzeigers. Als Anfangspunkt der Zählung dient hierbei der Widderpunkt oder Frühlings-Tag-und-Nachtgleichenpunkt, wo die Sonne, welche im Laufe eines Jahres einen den Aequator unter $23\frac{1}{2}°$ schneidenden Großkreis, die sogenannte Ekliptik, am Himmelsgewölbe beschreibt, von der Südseite des Aequators auf die Nordseite übergeht, mit anderen Worten: ihr Ort am Frühlingsanfang.

Statt in Bogenmaß gibt man in der Astronomie die Rektaszension häufig in Zeit an, weil man die Rektaszensionen mit Hilfe der Sternzeituhren, welche im Moment des Durchganges des Widderpunktes durch den Meridian null Uhr zeigen, zu messen pflegt. Für die Umwandlung von Bogenmaß und Zeitmaß ineinander hat man, wenn mit h, m, s die Stunde, Zeitminute und Zeitsekunde bezeichnet werden:

$$24^h = 360°$$

folglich

$$1^h = 15°;\quad 1° = 4^m$$
$$1^m = 15';\quad 1' = 4^s$$
$$1^s = 15'';\quad 1'' = 0{,}067^s.$$

Digitized by Google

Auf die Ekliptik als Grundebene bezieht sich das Koordinatensystem der Längen und Breiten, deren erstere vom Widderpunkt in der Ekliptik in demselben Sinne wie die Rektaszensionen von 0 bis 360 Grad gezählt werden.

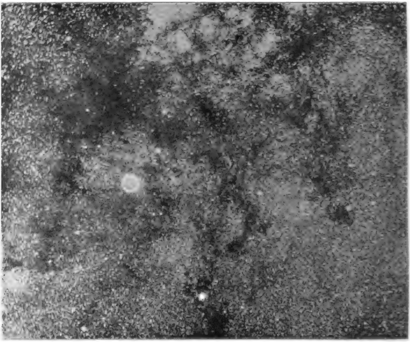


Fig. 3. Milchstraße bei *ϑ Ophiuchi.*

Die Azimute und Höhen endlich haben den Horizont zur Grundebene, und zwar zählt man die Azimute vom Südpunkt oder Nordpunkt des Horizontes an meist nur von 0 bis 180 Grad, indem man östliches und westliches Azimut unterscheidet.

2e) Lagenänderung der Koordinatensysteme durch die Präzession. Da die Erdachse eine als Präzession bezeichnete kegelförmige Bewegung ausführt, so ändern auch die in der Verlängerung der Erdachse liegenden Pole der Himmelskugel ihre Lage und infolgedessen natürlich auch der Himmelsäquator. Es beschreiben die Pole des Aequators um die Pole der Ekliptik während 26 000 Jahren Kreise von 23½° Halbmesser. Die Schnittpunkte des Aequators und der Ekliptik gehen demzufolge jährlich um 50″ auf der letzteren zurück, wobei die Neigung der beiden Kreise zueinander im wesentlichen dieselbe bleibt. Da aber für die Deklination die Lage des Aequators und für die Rektaszension außerdem noch die Lage des Widderpunktes maßgebend ist, so muß bei genauerer Angabe eines Sternortes noch hinzugefügt werden, für welche Zeit Rektaszension und Deklination gelten. Es ist z. B. für *Arkturus* (*α Bootis*) die Rektaszension α und die Deklination δ

am Jahresanfang . . . . 1900,0: $\alpha = 212° \; 46' \; 30'' = 14^h \; 11^m \; 6{,}0^s$; $\delta = +19° \; 42' \; 11''$,
am Jahresanfang . . . . 1920,0: $\alpha = 213° \; 0' \; 10'' = 14^h \; 12^m \; 0{,}7^s$; $\delta = +19° \; 35' \; 54''$.

Digitized by Google

Die periodischen Lagenänderungen des Aequators, durch welche die Sternkoordinaten sich natürlich auch um einige Bogensekunden ändern, werden als Nutation bezeichnet. Durch Präzession und Nutation erfährt, wie nochmals hervorgehoben sei, nur das Koordinatensystem, nicht aber die gegenseitige Lage der Sterne eine Aenderung.

3. Ort und Bewegung der Sterne im Raum. 3a) Entfernung der Sterne; ihre Parallaxe. Zur Bestimmung der Entfernung eines Sternes muß man den Winkel messen, um welchen man die Richtung des Fernrohres zu ändern hat, wenn man den Stern zu zwei, ein halbes Jahr auseinander liegenden Zeiten beobachtet, so daß die Erde bei den beiden Beobachtungen in E und E' (s. Fig. 4) auf entgegengesetzten Seiten von der Sonne S steht und PS senkrecht auf EE' ist. Die beiden Richtungen EP und E'P sind offenbar um den doppelten Winkel p voneinander verschieden, unter welchem vom Stern P aus die Entfernung SE der Erde von der Sonne erscheint und den man die Parallaxe des Sternes nennt.

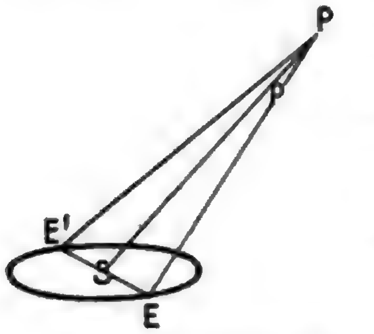


Fig. 4. Fixsternparallaxe.

Die vergeblichen Bemühungen zur Auffindung einer Sternparallaxe wurden früher als ein Einwurf gegen die Kopernikanische Lehre von der Bewegung der Erde um die Sonne angeführt. Den ersten nicht als illusorisch anzusehenden Wert einer Parallaxe fand Bessel (1784 bis 1846, Direktor der Sternwarte zu Königsberg i. Pr.) ums Jahr 1838 bei dem durch seine große Eigenbewegung (s. 3c) auf eine geringe Entfernung hinweisenden und darum von ihm gewählten Stern *61 Cygni*; er fand als Resultat 0,"35, während spätere Bestimmungen 0,"50 ergaben. Die von Bessel befolgte Methode bestand darin, daß er mit seinem Heliometer, einem Fernrohr, dessen Objektiv in zwei aneinander verschiebbare Hälften geteilt ist, die Abstände des zu untersuchenden Sternes von mehreren benachbarten Sternen ausmaß; aus den über mehrere Jahre sich erstreckenden Beobachtungen erkannte er dann eine Ortsveränderung des Sternes von der Periode eines Jahres. Heute wird die Photographie mit Erfolg für solche Untersuchungen verwandt. Man findet auf diese Weise allerdings immer nur die relative Parallaxe eines Sternes gegen seine Nachbarsterne, von denen möglicherweise der eine oder andere selbst eine Parallaxe zeigt. Bis jetzt sind von etwa 200 Sternen Parallaxenbestimmungen ausgeführt worden.

Ein Stern, der senkrecht über der Ekliptik, also im Pol der Ekliptik steht, wird der Parallaxe zufolge während eines Jahres einen Kreis mit dem Halbmesser p an der Himmelskugel beschreiben, ein in der Ekliptik liegender Stern wird auf einem kleinen Bogen von der Größe 2p hin- und zurückgehen, die zwischen der Ekliptik und ihren Polen liegenden Sterne werden jährlich eine Ellipse beschreiben, deren halbe große Achse gleich p und deren halbe kleine Achse, wie leicht zu sehen, gleich $p \sin\beta$ ist, wenn mit β die Breite des Sternes bezeichnet wird.

Ein Stern von der Parallaxe 1" hat offenbar, wenn R den Erdbahnhalbmesser bezeichnet, die Entfernung R.cosec 1", oder wenn man unter einem Lichtjahr die Entfernung versteht, welche das Licht, dessen Geschwindigkeit bekanntlich 300 000 km in der Sekunde beträgt, in einem Jahre zurücklegt, die Entfernung von 3,3 Lichtjahren. Auffallend ist, daß mehrere sehr helle Sterne wie *Arktur* eine außerordentlich geringe, mit Sicherheit gar nicht zu verbürgende Parallaxe haben, also unmeßbar weit entfernt sind.

Im folgenden ist für eine Anzahl von Sternen die Parallaxe und die Entfernung in Lichtjahren angegeben; auch ist gleich die unter 3c und 3d zur Sprache kommende Bewegung der Sterne senkrecht und parallel zur Gesichtslinie hinzugefügt.

(Tabelle siehe nächste Seite.)

Bei *α Aurigae* (*Capella*), *β Geminorum* (*Pollux*), *α Orionis* (*Beteigeuze*), *α Leonis* (*Regulus*), *α Cygni* (*Deneb*) hat man eine Parallaxe mit Sicherheit nicht nachweisen können. Bei letztgenanntem Stern wurde zwar eine, wenn auch nicht sicher zu verbürgende jährliche Aenderung der Entfernung gegen die Nachbarsterne gefunden, aber in dem entgegengesetzten Sinne als man erwartet hatte. Die Parallaxe ergab sich zu —0,"01, d. h. der Stern befindet sich, wenn man dem Resultat überhaupt Vertrauen beimessen will, weiter von uns entfernt als die Vergleichsterne. Der Weltenraum ist, wie die geringen Werte der Parallaxe erkennen lassen, nur sehr spärlich mit Himmelskörpern besetzt; gibt man der Sonne die Größe eines Senfkornes, so ist *α Centauri*, der nächste uns bekannte Fixstern, hundert Kilometer von ihr entfernt zu denken.

Um den Durchschnittswert der Parallaxe einer größeren Zahl von Sternen zu finden, deren Eigenbewegung (s. 3c)

Name des Sternes	Größe	Rektaszension 1900	Deklination 1900	Parallaxe	Entfernung in Lichtjahren	Eigenbewegung	Geschwindigkeit in der Gesichtslinie
α Centauri	1	14h 33m	—60°25′	0,″75	4,3	3,″61	— 22 km
Lalande 21185	7,5	10 58	+36 38	0,40	8	4,76	—
α Canis majoris (Sirius)	1	6 41	—16 35	0,37	9	1,31	— 8
α Canis minoris (Prokyon)	1	7 34	+ 5 29	0,33	10	1,25	— 4
Cordobaer Zonenkatalog 5h 243	8	5 8	—44 58	0,31	11	8,72	+242
61 Cygni	5,5	21 2	+38 15	0,30	11	5,20	— 62
α Aquilae (Atair) . . .	1	19 46	+ 8 36	0,23	14	0,66	— 33
Groombridge 1830 . . .	7	11 47	+38 26	0,15	22	7,04	— 95
α Lyrae (Wega) . . .	1	18 34	+38 41	0,08	41	0,35	— 15
α Bootis (Arkturus) . .	1	14 11	+19 42	0,03	109	2,28	— 5

bekannt ist, hat Kapteyn, Vorsteher des astronomischen Laboratoriums in Groningen, folgende Erwägung angestellt. Die Eigenbewegung eines Sternes setzt sich zusammen aus der zur Gesichtslinie senkrechten Komponente seiner ihm selbst zukommenden Bewegung und aus der parallaktischen Verschiebung, welche er durch die Bewegung des Sonnensystems erfährt. Bei einer großen Anzahl über den Himmel verstreuter Sterne, etwa der einer bestimmten Größenklasse, werden die den Sternen selbst angehörenden Bewegungen nach allen Richtungen hin zielen und sich bei der Summierung aufheben, so daß sich der von der Sonnenbewegung abhängige Teil, die parallaktische Verschiebung, daraus ableiten läßt. Da man aber die Bewegung der Sonne im Raum kennt, so kann man aus der parallaktischen Verschiebung die durchschnittliche Entfernung der in Betracht gezogenen Sterne berechnen. Voraussetzung für die Zulässigkeit dieser Methode ist, daß die einzelnen Sterne einer Größenklasse nicht allzusehr von ihrem Mittelwert abweichen; denn nur in diesem Fall hat die Bildung eines Mittelwertes einen Sinn. Kapteyn fand folgende Durchschnittsparallaxen für die Sterne der verschiedenen Größenklassen:

Größe	Parallaxe	Größe	Parallaxe
1,0	0,″059	6,0	0,″014
2,0	0,044	7,0	0,010
3,0	0,033	8,0	0,008
4,0	0,025	9,0	0,006
5,0	0,019	10,0	0,004

3b) Aberration. Da der Lichtstrahl, welcher uns allein von der Sternenwelt Kunde gibt, nicht geringe Zeit braucht, um von dort zu uns zu gelangen, so gehören die Ereignisse, welche wir an den Sternen beobachten, wie plötzliches Aufleuchten u. dgl., in Wirklichkeit schon längst vergangenen Zeiten, vielleicht einem früheren Jahrtausend an. Auch können wir von einem Stern, nach dem wir blicken, nicht behaupten, daß er dort stehe, sondern nur, daß er sich zu der Zeit, als der uns jetzt treffende Lichtstrahl von ihm ausging, dort befunden habe. Aber auch diese durch die Beobachtung gegebene Richtung nach jenem damaligen Ort bedarf noch einer Verbesserung, weil die Geschwindigkeit des Lichtes zwar 10 000 mal so groß ist wie die Geschwindigkeit der Erde in ihrer Bahn, aber doch nicht unendlich groß im Vergleich zu ihr.

In Figur 5 sei ST ein von einem Fixstern ausgegangener, senkrecht auf die Richtung

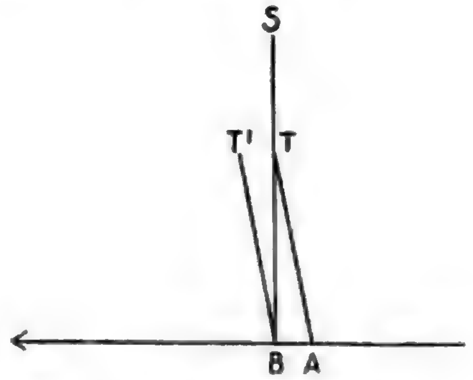


Fig. 5. Aberration.

AB der Erdbewegung fallender Lichtstrahl. Er treffe mit der Erde im Punkte B zusammen. Eine Sekunde vorher möge er noch in T, die Erde in A gewesen sein. Man wird daher dem Fernrohr in A die Richtung AT geben müssen, damit bei Bewegung der Erde von A nach B der von T nach B gehende Lichtstrahl immer in der Achse des parallel sich verschiebenden Fernrohres bleibe. Das Fernrohr hat daher in B die Richtung BT′, wenn der von S kommende

Digitized by Google

Lichtstrahl das Auge des Beobachters in B trifft. Man bezeichnet diese scheinbare Ablenkung des Lichtstrahles, der zufolge das Fernrohr aus dessen wahrer Richtung etwas nach der Seite hin, nach welcher sich die Erde bewegt, geneigt werden muß, als die Aberration des Lichtes.

Fällt, wie in Figur 5 angenommen, der Lichtstrahl senkrecht auf die Bewegungsrichtung der Erde, so hat die Aberration ihren größten Betrag von 20,″47, ∢TBT′ in der Figur. Ist die Bewegung der Erde direkt auf den Ort hin gerichtet, aus welcher der Lichtstrahl kommt, so braucht das Fernrohr aus dieser Richtung nicht abgelenkt zu werden, die Aberration ist gleich Null. Fällt der Lichtstrahl schiefwinklig auf die Richtung der Erdbewegung ein, so ist das Fernrohr um einen zwischen 20,″47 und 0″ liegenden Betrag nach der Richtung, in welcher sich die Erde bewegt, zu neigen. Ein im Pol der Ekliptik stehender Stern wird, weil seine Strahlen stets senkrecht auf die Richtung der Erdbewegung fallen, auch stets um 20,″47 von seinem wahren Ort abgelenkt erscheinen und daher, während die Erde im Laufe eines Jahres einen Kreis um die Sonne beschreibt, an der Himmelskugel einen Kreis von 20,″47 Halbmesser zurücklegen. Ein in der Ekliptik liegender Stern wird während eines Jahres in einer geraden Linie hin und her gehen, im Maximum 20,″47 vom wahren Ort abweichend, und ein zwischen Ekliptik und deren Pol befindlicher Stern wird während des Jahres eine Ellipse von der halben großen Achse 20,″47 und von der halben kleinen Achse $20,''47 . \sin \beta$ beschreiben, wenn unter β die Breite des Sternes verstanden wird.

Die Erscheinung hat viel Aehnlichkeit mit der parallaktischen Verschiebung. In beiden Fällen geschieht die Bewegung des Sternes um seinen eigentlichen Ort, wenn er nördlich von der Ekliptik liegt, im Sinne der Drehung des Uhrzeigers, und im entgegengesetzten Sinn, wenn er südlich von der Ekliptik liegt. Die Richtungen, in welchen die Verschiebungen bei Aberration und Parallaxe erfolgen, sind aber um 90° verschieden.

Auch die Geschwindigkeit eines durch die Erdrotation um die Erdachse bewegten Ortes, welche, wenn mit φ die geographische Breite bezeichnet wird, $\frac{2\pi . 6377 \cos\varphi}{86400} = 0{,}464 \cos\varphi$ Kilometer in der Sekunde beträgt, darf bei exakten Beobachtungen nicht als unendlich klein gegen die Lichtgeschwindigkeit betrachtet werden. Ein in der Meridianebene liegender Strahl erscheint um $0,''319 \cos\varphi$ nach Osten hin abgelenkt. Ein Stern beschreibt der täglichen Aberration zufolge während eines Tages eine Ellipse am Himmel von der halben großen Achse $0'',319 \cos\varphi$ und der halben kleinen Achse $0,''319 \cos\varphi \sin\delta$, wenn δ die Deklination des Sternes bezeichnet. Die Werte 20,″47 und 0,″319 werden die Konstanten der jährlichen und der täglichen Aberration genannt. Entdeckt wurde die Aberration von Bradley (1692 bis 1761, Direktor der Greenwicher Sternwarte).

3c) Bewegung senkrecht zur Gesichtslinie. Die zu Eingang des Artikels gemachte Angabe, daß die Fixsterne ihren Ort an der Himmelskugel beibehielten, bedarf der Einschränkung. Zwar erscheint auch heute noch das Sternbild des *Orion* von derselben Gestalt wie zur Zeit Homers, die Vergleichung älterer und neuerer genauer Positionsbestimmungen läßt aber bei vielen, bis heute bei etwa 10000 Sternen, eine deutliche Ortsveränderung am Himmel erkennen, welche man ihre Eigenbewegung nennt, obwohl diese Bezeichnung, nachdem man jetzt auch die unter 3d zu besprechende Bewegung in der Gesichtslinie hat bestimmen lernen, nicht mehr recht zutreffend ist. Die Eigenbewegung rührt zum Teil daher, daß unsere Sonne mit den um sie kreisenden Planeten im Weltenraum sich mit einer Geschwindigkeit von 20 km in der Sekunde nach dem Sternbild des Herkules bewegt, wodurch die verschieden weit von uns entfernten Sterne parallaktisch verschoben werden, zum Teil aber daher, daß auch die Fixsterne nach den verschiedensten Richtungen und mit sehr verschiedenen Geschwindigkeiten den Raum durcheilen.

Im folgenden Täfelchen sind die fünf Sterne mit den größten bis jetzt bekannten Eigenbewegungen zusammengestellt.

Name des Sternes	Größe	Rektaszension 1900	Deklination 1900	Eigenbewegung
Cordobaer Zonenkatalog 5h.243	8	5h 8m	−44°58′	8″,7
Groombridge 1830	6	11 47	+38 26	7,0
Lacaille 9352	7,5	22 59	−36 26	6,9
Cordobaer Gen. Kat. 32 416 . .	8,5	0 0	−37 51	6,2
61 Cygni	5,5	21 2	+38 15	5,2

Unter den 47 bisher gefundenen Sternen, deren jährliche Eigenbewegung größer als 1,″5 ist, befinden sich nur zwei Sterne erster Größe, nämlich *α Centauri* mit 3,″7 und

Digitized by Google

α Bootis mit 2″,3. Immerhin spricht dieser Umstand nicht gegen die Annahme, daß die helleren Sterne im allgemeinen die uns näheren sind, weil es eben sehr viel mehr schwächere Sterne gibt als helle. Starke Eigenbewegungen kommen jedenfalls selten vor, eine Abzählung ergab unter 9300 Sternen nur 26, die sich um mehr als 20″ im Jahrhundert bewegen.

Weiß man die Entfernung eines Sternes von bekannter Eigenbewegung, so läßt sich die zur Gesichtslinie senkrechte Komponente seiner Geschwindigkeit angeben. Der Stern *Cordobaer Zonenkatalog 5ʰ,243* hat z. B. eine Entfernung von 10,5 Lichtjahren und bewegt sich jährlich 8,″7 am Himmel; seine Geschwindigkeit senkrecht zur Gesichtslinie beträgt daher 134 km in der Sekunde. *Groombridge 1830* hat bei einer Entfernung von 22 Lichtjahren und bei einer jährlichen Eigenbewegung von 7,″0 eine Geschwindigkeit senkrecht zur Gesichtslinie von 225 km in der Sekunde.

3d) Bewegung in der Gesichtslinie. Die Bestimmung dieser Bewegungskomponente der Fixsterne ermöglicht das Dopplersche Prinzip. Erhalten wir nämlich von einer, beispielsweise aus glühendem Natrium bestehenden Lichtquelle, wenn sie sich in Ruhe befindet, 509 Billionen Lichtwellen in der Sekunde, so erhalten wir, wenn sie sich auf uns zu bewegt, eine größere, und wenn sie sich von uns weg bewegt, eine geringere Anzahl Lichtwellen. Die im gelben Teil eines Sternspektrums auftretende D-Linie wird daher, wenn die Lichtquelle sich nähert, etwas nach dem blauen, im entgegengesetzten Fall nach dem roten Ende des Spektrums verschoben sein. Umgekehrt läßt sich aus der Größe der Verschiebung der Spektrallinien die Geschwindigkeit, mit der die Lichtquelle sich der Erde nähert oder von ihr entfernt, berechnen.

In dem unter 3a gegebenen Täfelchen sind den dort aufgeführten Sternen ihre auf die Sonne bezogenen, in Kilometern ausgedrückten Geschwindigkeiten in der Gesichtslinie beigefügt, wobei das Pluszeichen eine Vergrößerung der Entfernung zwischen Stern und Sonne, das Minuszeichen eine Verminderung bezeichnen soll.

Die bis jetzt bestimmten 1700 Geschwindigkeiten in der Gesichtslinie haben sich von ziemlich der gleichen Größe ergeben wie die in der dazu senkrechten Richtung. Die größten bisher bekannt gewordenen Werte von + 242, — 132, + 100, — 95 km besitzen die Sterne *Cordobaer Zonenkatalog 5ʰ,243*, *Lacaille 8362*, *Lacaille 2957* und *Groombridge 1830*.

Kennt man die beiden senkrecht aufeinander stehenden Geschwindigkeitskomponenten, so ist es natürlich ein leichtes, Größe und Richtung der Resultante zu finden. Für *Cordobaer Zonenkatalog 5ʰ,243* ergibt sich 277 km, für *Groombridge 1830* 244 km als Geschwindigkeit in der Sekunde.

4. Chemisch-physikalisches Verhalten der Sterne. 4a) Einteilung der Sterne auf Grund ihrer Spektren. Die auf den Fixsternen vorkommenden chemischen Elemente dürften genau die nämlichen sein, welche auch auf der Sonne und auf der Erde vorkommen. Wenigstens gleicht z. B. das Spektrum von *α Aurigae* bis ins kleinste dem Sonnenspektrum. Bei anderen Sternen hat man allerdings eine größere Anzahl Spektrallinien nicht oder nicht mit Sicherheit mit Linien bekannter Elemente identifizieren können, doch dürften sie weniger fremden Elementen ihren Ursprung verdanken als den eigenartigen auf jenen Himmelskörpern herrschenden Bedingungen, unter welche wir in unseren Laboratorien die Elemente noch nicht zu bringen verstehen. Daß in den äußerst hohen Temperaturen der Fixsterne die Elemente alle dissoziiert vorkämen, ist nicht anzunehmen, vielmehr werden sich dort diejenigen Verbindungen gebildet haben und beständig sein, welche unter Wärmeentwickelung entstehen.

Nach ihrem durch das Spektroskop erschlossenen, vielleicht oft nur für erschlossen gehaltenen, physikalischen Zustand sind die Sterne von verschiedenen Astrophysikern, insbesondere von Secchi (1818 bis 1878, Direktor der Sternwarte des Collegio Romano in Rom), Vogel (1841 bis 1907, Direktor des Astrophysikalischen Observatoriums in Potsdam), Scheiner, Lockyer (Direktor des Solar Physics Observatory in South Kensington), Pickering in Klassen eingeteilt worden. Die in Deutschland bisher meist gebrauchte Vogelsche Einteilung, welche in ihren drei Klassen sich dem vermutlichen Entwickelungsgang der Sterne anzupassen sucht, während die Unterabteilungen einander koordiniert sein sollen, ist die folgende:

I. Klasse. Sie umfaßt die weißen Sterne, d. h. diejenigen, welche sich im Zustande höchster Glühhitze befinden. Infolge Uebertwiegens der chemisch wirksamen Strahlen tritt das violette Ende des Spektrums stark hervor. Drei Unterabteilungen:

Ia) Die Absorptionslinien des Wasserstoffs (C, F, Hγ, h) sind stark und breit, während die anderen, dem Calcium, Natrium, Magnesium, hauptsächlich aber dem Eisen angehörigen Metallinien in geringer Zahl und nur schwach angedeutet vorkommen. Heliumlinien nicht vorhanden. Beispiele: *Sirius*, *Wega*, *α Leonis*, *β Librae*, *α Ophiuchi*.

Digitized by Google

Ib) Die Wasserstofflinien sind vorhanden, aber weniger scharf und in der Mitte aufgehellt. Sie erscheinen etwa gleich breit und Ende des Spektrums hin scharf, nach dem roten hin unscharf begrenzt sind. *α Herculis*, *α Orionis*, *β Pegasi*.

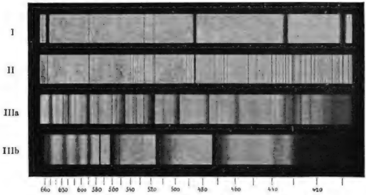


Fig. 6. Typische Spektren Vogelscher Spektralklassen. Die Zahlen geben die Wellenlängen in $\mu\mu$ an.

scharf begrenzt wie die wenigen anderen Linien, des Heliums, Calciums, Siliciums, Magnesiums und Eisens. *β*, *γ*, *ε Orionis*, *α Cygni*.

Ic) Die Wasserstofflinien sind hell, ebenso die Linien der unter Ib noch genannten Metalle. *γ Cassiopeiae*.

II. Klasse. Hierher gehören die gelblichen Sterne. Diese sind von Atmosphären umgeben, die schon kräftiger absorbieren, so daß die Fraunhoferschen Linien gut zu erkennen sind. Das violette Ende des Spektrums nicht mehr so stark überwiegend.

IIa) Das kontinuierliche Spektrum enthält besonders im Grün und Gelb kräftige und scharfe Absorptionslinien. Die Wasserstofflinien nicht ganz so intensiv und breit wie bei Klasse I. *Sonne*, *Capella*, *Arcturus*, *Aldebaran*.

IIb) Wolf-Rayet-Sterne. Es ist ein kontinuierliches Spektrum mit den Fraunhoferschen Linien vorhanden, daneben aber einzelne helle Linien, deren Zugehörigkeit teilweise noch nicht bekannt ist. *T Coronae*, *R Geminorum*, *γ Velorum*.

III. Klasse. Sie enthält die rötlichen Sterne. Diese befinden sich in verhältnismäßig niedriger Gluthitze, ihre Atmosphären üben eine starke, sich durch kräftige Banden verratende Absorption aus.

IIIa) Die Fraunhoferschen Linien sind zahlreich und intensiv. Daneben treten Absorptionsbanden auf, die nach dem violetten

IIIb) Die Absorption überwiegt vollständig. Das violette Ende des Spektrums ist sehr schwach, die Absorptionsbanden, umgekehrt wie bei IIIa, scharf nach der roten, unscharf nach der violetten Seite hin begrenzt. Schwächere rote Sterne.

Die Secchischen Spektralklassen — die fünfte ist von Pickering hinzugefügt — stimmen mit den Vogelschen Klassen bezw. Unterabteilungen in folgender Weise überein:

Vogel	Ia	IIa	IIIa	IIIb	Ic
Secchi	I	II	III	IV	V

Die Sterne vom Typus Ib werden, weil in ihrem Spektrum die Heliumlinien auftreten, oft Heliumsterne oder auch nach dem Sternbild, in dem sie hauptsächlich vorkommen, Orionsterne genannt. Bis jetzt sind etwa 1000 bekannt. Sie liegen in Gruppen vereinigt nahe der Milchstraße und sind von uns weit entfernt. Nach L. Boß (Direktor des Dudley Observatory in Albany, N. Y.) steht innerhalb einer Kugel, die einer Parallaxe von 0,″015 entspricht, also einen Halbmesser von 220 Lichtjahren hat, kein Heliumstern. Ihre durchschnittliche Eigenbewegung beträgt nur 5″ im Jahrhundert und kommt wohl allein durch die Bewegung unseres Sonnensystems zustande. Auch ihre Bewegung in der Gesichtslinie ist gering befunden worden, durchschnittlich in der Sekunde 6 km gegen das System der Sterne, während die rötlichen Sterne im allgemeinen

größere Geschwindigkeiten senkrecht zur Gesichtslinie und in derselben zeigen, in letzterer Richtung 16 bis 17 km gegen das System der Sterne. Man hat daher den Schluß gezogen, daß die jüngsten Sterne, als welche man die Heliumsterne ansieht, keine oder nur eine geringe Geschwindigkeit haben, daß diese aber wächst während der folgenden Entwickelungsstadien der Sterne.

Die Aufhellung in der Mitte der Linien bei den *Orionsternen* dürfte sich durch die Annahme erklären lassen, daß die Höhe der Atmosphäre von gleicher Ordnung ist wie der Durchmesser des leuchtenden Kernes. Der Teil der Atmosphäre, welcher von uns aus gesehen vor dem Kern liegt, wird absorbierend wirken, der andere Teil aber, welcher über die Scheibe des Kernes hinausragt, ein Spektrum mit hellen Linien liefern.

Gewisse Sterne, welche eine unmeßbare Parallaxe haben, leuchten doch sehr intensiv, darunter selbst rötliche Sterne, wie *Arkturus*, die sich also nicht in höchster Glühhitze befinden. Da die Flächenhelligkeit bei ihnen nicht gar bedeutend sein kann, so muß wenigstens ihre Oberfläche sehr groß sein, damit sie jene große Lichtmenge aussenden kann. Es mögen daher solche Sterne mehrere hundertmal unsere Sonne an Größe und erst recht an Masse übertreffen.

Sterne von dem interessanten Typus IIb wurden zuerst entdeckt 1867 von den Astronomen Wolf und Rayet in Paris. Die bis jetzt bekannten, 55 an der Zahl, sind bis auf einen, *γ Velorum*, der 3. Größe ist, schwache Sterne und liegen ganz nahe der Milchstraße.

Bei Lockyer haben die einzelnen Klassen, welche mit denen Vogels nahezu identisch sind, entsprechend seinen Ansichten über die Entwickelung der Himmelskörper eine andere Anordnung.

E. Pickering lehnte sich bei seiner Einteilung der Sternspektren an Secchi an und erhielt durch Spaltung der Klassen I und II im ganzen 16 Klassen, die mit Buchstaben bezeichnet wurden. Später etwas umgeändert, wodurch die Buchstaben eine sonderbare Aufeinanderfolge bekommen haben, ist die jetzt meist gebräuchliche sogenannte Draperklassifikation der Spektren die folgende:

Klasse O: Hauptsächlich helle Linien im Spektrum. Wolf-Rayet-Sterne.

Klasse B: Einige Heliumlinien haben dieselbe Intensität wie die Wasserstofflinien. Orion- oder Heliumsterne.

Klasse A: Die stärksten Linien sind die Wasserstofflinien. Die Calciumlinie K und die Sonnenlinien sind schwach. Siriussterne.

Klasse F: Die Calciumlinien H und K und die Sonnenlinien sind kräftiger als die Wasserstofflinien. *δ Aquilae.*

Klasse G: Die Calciumlinien H und K und die Liniengruppe G besonders auffallend. Sonnensterne, *α Aurigae.*

Klasse K: Die Calciumlinien H, K, g und die Gruppe G sehr kräftig. Die Intensität des kontinuierlichen Spektrums nimmt nach den kleineren Wellenlängen bedeutend ab. *α Bootis.*

Klasse M: Wie bei Klasse K; außerdem treten Banden im blaugrünen und grünen Teil des Spektrums auf.

Klasse N: Absorptionsbanden, scharf auf der roten, unscharf auf der violetten Seite begrenzt.

Klasse P: Planetarische Nebel.

Klasse Q: Spektren, die sich in die anderen Klassen nicht einreihen lassen.

Die Spektren, welche Uebergänge zwischen den Klassen darstellen, werden durch angehängte Ziffern 1 bis 9 charakterisiert, so daß z. B. B_3 ein zwischen B und A, aber an B wesentlich näher als an A liegendes Spektrum bezeichnet.

Die Beziehung zwischen der Vogelschen und der eben angeführten von Pickering und Miß Cannon für den Draperkatalog der Sternspektren benutzten Einteilung ist durch folgendes Täfelchen gegeben:

Vogel.	Ia	Ib	Ia—IIa	IIa	IIb	IIa—IIIa	IIIa	IIIb
Pickering-Cannon . .	A	B	F	G	O	K	M	N

Vgl. auch den Artikel „Spektroskopie".

4b) Farbe der Sterne. Nur Weiß, Gelb und Rot nebst den dazwischen liegenden Uebergängen kommen als Farben der Sterne vor. Die bisweilen bei Doppelsternen für die eine Komponente derselben angegebene Farbe Blau oder Grün ist dem Beobachter nur durch Kontrastwirkung vorgetäuscht worden. Nach Vogel hängt die Farbe eines Sternes mit seinem Entwickelungszustand zusammen, indem ein weißer Stern infolge der Abkühlung durch Ausstrahlung die gelbe und dann die rote Farbe annimmt. *Sirius, Wega, Atair* sind weiß, *Capella* gelblich, *Aldebaran, Arktur* und *Antares* rot. Einer der rötesten Sterne ist *μ Cephei*, der von W. Herschel (1738 bis 1822, Privatastronom des Königs Georg III. von England) als Granatstern bezeichnet wurde, ein Stern 5. bis 6. Größe, der, wie das häufig mit den roten Sternen der Fall ist, zu den unter 4d

Digitized by Google

zu besprechenden Veränderlichen gehört.

Eine Farbenänderung, wie sie nach den heutigen Ansichten von der physikalischen Entwickelung der Sterne im Laufe großer Zeiträume eintreten muß, ist bisher noch nicht beobachtet worden. Die vermutete Farbenänderung des *Sirius*, der jetzt weiß ist und früher rötlich gewesen sein soll, ist nach Schiaparelli (1835 bis 1910, Direktor der Sternwarte zu Mailand) auf falsche Interpretation einiger Stellen von Schriftstellern des Altertums zurückzuführen. Ein periodischer Farbenwechsel wird von *α Ursae majoris* behauptet, doch bedarf er wohl noch der Bestätigung. Dagegen ist bei den neuen Sternen der Farbenwechsel eine fast regelmäßige Begleiterscheinung (s. 4e).

4c) Temperatur der Sterne. Auf die Verschiedenheit der Temperaturen der Sterne deutet schon die Verschiedenheit der Farben. Die Erfahrungen des täglichen Lebens sagen uns schon, daß wir den weißen Sternen die höchste Temperatur zuzuschreiben haben, eine geringere den gelben und noch eine niedrigere den roten. Wissenschaftlich ist diese Annahme begründet durch das Wiensche Verschiebungsgesetz, welches besagt, daß für den sogenannten schwarzen Körper das Produkt aus der absoluten Temperatur und der Wellenlänge des Intensitätsmaximums im Emissionsspektrum eine Konstante ist. Nun sind die Fixsterne allerdings keine „schwarzen Körper“, Körper nämlich, welche alle auf sie fallenden Strahlen zu absorbieren imstande sind, dabei aber, wie zur Vermeidung eines Mißverständnisses hinzugefügt sei, nichts weniger als von dunkler Farbe zu sein brauchen; immerhin dürften sie sich hinsichtlich ihres Absorptions- und Emissionsvermögens nicht so weit vom schwarzen Körper entfernen, daß das Wiensche Verschiebungsgesetz nicht wenigstens in den gröbsten Zügen auf sie angewandt werden könnte.

Durch Messung der Strahlungsintensität der verschiedenen Wellenlängen in den Spektren von über hundert Fixsternen und Anwendung des eine Beziehung zwischen Strahlungsintensität, Temperatur und Wellenlänge gebenden Planckschen Strahlungsgesetzes haben Wilsing und Scheiner auf dem Astrophysikalischen Observatorium zu Potsdam die Temperatur dieser Sterne bestimmt unter der Annahme, daß sie sich wie schwarze Körper verhielten. Im Mittel ergaben sich für die Sterne der drei Vogelschen Spektralklassen die Temperaturen 9500, 5500 und 3200 Grad. Für einige jener Sterne, nämlich *α Andromedae*, *δ Aquilae* und *η Pegasi* sind auch auf der Wiener Sternwarte von Hnatek die Temperaturen bestimmt worden, wobei sich eine befriedigende Uebereinstimmung ergab. Es waren die in Potsdam gefundenen Temperaturen der drei Sterne 8000, 6400 und 4200 Grad und die in Wien gefundenen Temperaturen 8490, 6150 und 4000 Grad. Für die Temperatur der Sonne nehmen die Physiker als besten Wert jetzt 5600 Grad an.

4d) Veränderliche Sterne. Bei vielen Fixsternen hat man periodische Helligkeitsänderungen wahrgenommen. Als erster von diesen, deren jetzt über 1000 bekannt sind, wurde *o Ceti* im Jahr 1596 vom friesischen Pfarrer David Fabricius entdeckt. Der bisher von ihm nicht wahrgenommene Stern leuchtete damals als Stern 2. Größe auf, wurde im nächsten Jahr aber nicht mehr gesehen. Erst später fand man, daß die *Mira Ceti*, wie der Stern auch genannt wurde, in einer Periode von durchschnittlich 332 Tagen in sehr unregelmäßiger Weise ihre Helligkeit ändert, indem sie von der 8. oder 9. Größe, ihrer Minimalhelligkeit, einmal bis zur 2., ein andermal aber nur bis zur 4. oder 5. Größe emporsteigt.

In schroffem Gegensatz zu dem erstentdeckten steht durch die Kürze seiner Periode und die Regelmäßigkeit seines Lichtwechsels der an zweiter Stelle entdeckte Veränderliche *β Persei* oder *Algol*. Montanari (1633 bis 1687, Professor der Astronomie in Bologna und Padua) stellte im Jahr 1667 seine Veränderlichkeit fest, seine Periode und den Verlauf der Helligkeitsänderung erkannte erst 1782 Goodricke (1765 [?] bis 1786, in York, England). 2 Tage 12 Stunden leuchtet *Algol* als Stern 2,3. Größe, sinkt dann in 4½ Stunden zur 3,5. Größe herab und steigt in weiteren 4½ Stunden wieder auf seine Maximalhelligkeit. Aus der Verbindung von zeitlich weit auseinander liegenden Beobachtungen läßt sich die Periode des Lichtwechsels *Algols* bis auf Bruchteile der Sekunde sicher bestimmen. Sie beträgt $2^d\ 20^h\ 48^m\ 51^s,1$, hat sich aber im Laufe der Jahrzehnte bisweilen um einige Sekunden bald verkürzt, bald verlängert und betrug z. B. zu Goodrickes Zeiten bis 1832 $2^d\ 20^h\ 48^m\ 58^s,5$.

In der letzten Zeit sind, besonders mit Hilfe der Photographie, in manchen Jahren über hundert Veränderliche entdeckt worden, so daß die von Argelander vorgeschlagene Bezeichnungsweise, wonach die Veränderlichen, wenn sie nicht bereits von Bayer oder Flamsteed mit Buchstaben oder Zahlen versehen sind, die letzten Buchstaben des Alphabets von R an unter Hinzufügung des Namens des Sternbildes erhalten sollen, längst nicht mehr genügt, weshalb man zu der Kombination zweier Buchstaben wie RR, RS usw. übergegangen ist. Besonders

Digitized by Google

haben sich manche kugelförmige Sternhaufen, ebenso die Magelhaensschen Wolken, außerordentlich reich an Veränderlichen gezeigt.

Veränderliche, welche für gewöhnlich in ihrer größten Helligkeit strahlen und nur während kürzerer Zeit die normale Helligkeit einbüßen, werden nach ihrem ebenerwähnten Vertreter Algolsterne, dagegen diejenigen, welche für gewöhnlich ihre geringste Helligkeit besitzen, Antalgolsterne genannt. Von den 88 zurzeit bekannten Algolsternen haben 64 eine Periode von weniger als 5 Tagen, *X Carinae* sogar von nur 13 Stunden. Die größte Periode unter den Algolsternen, nämlich von 262 Tagen, hat *RZ Ophiuchi*; 243 Tage verweilt er in seiner Maximalhelligkeit, 19 Tage braucht er zu seinem Lichtwechsel. Antalgolsterne kommen besonders in Sternhaufen vor. Die 15 außerhalb derselben bis jetzt gefundenen haben sämtlich Perioden von weniger als einem Tag. Zu bedenken ist hierbei allerdings, daß kurzperiodische Sterne viel eher Aussicht haben als veränderlich erkannt zu werden als langperiodische.

Bei den Sternen, welche ihre Helligkeit fortwährend ändern, unterscheidet man solche vom Typus *ζ Geminorum*, die sich durch gleichlang andauerndes Ansteigen und Sinken der Helligkeit auszeichnen, dann solche vom *δ Cephei*-Typus, bei denen die Helligkeitszunahme rascher erfolgt als die Helligkeitsabnahme, ferner solche vom *β Lyrae*-Typus, die außer einem Hauptminimum noch ein Nebenminimum besitzen, und solche vom *Mira*-Typus, deren Lichtwechsel nicht immer die gleiche Helligkeitsgrenze innehält; auch die Periode ist nicht immer konstant, sondern schwankt häufig um einen mittleren Wert; bei *Mira* selbst ist sie im Durchschnitt gleich 332 Tagen, beträgt aber mitunter auch 320 und 370 Tage.

Endlich sind noch die Veränderlichen zu erwähnen, bei denen sowohl der Bereich der Helligkeitsschwankung wie die Dauer der Periode ganz unregelmäßig ist. Hierher gehören die nur geringen Helligkeitsänderungen unterworfenen Sterne *α Cassiopeiae*, *α Herculis*, *α Orionis* und der wegen seiner roten Farbe als Granatstern bezeichnete *μ Cephei*; dann aber auch *R Coronae*, welcher von der 6. Größe, die er jahrelang besitzt, unerwartet in wenigen Wochen um 3 bis 9 Größenklassen herabsinkt, um dann nach einer nicht im voraus angebbaren Zeit wieder bis zur 6. Größe anzusteigen. Der ebenfalls hierher gehörige Stern *η Argus* erleidet seit 1867 als Stern 6. bis 7. Größe nur geringe Helligkeitsschwankungen, früher war er jedoch jahrelang 4. oder auch 2. Größe und wurde bisweilen einer der allerhellsten Sterne, so 1827, 1837 und namentlich 1843, wo er nur dem *Sirius* nachstand.

Der Stern von der kürzesten bis jetzt gefundenen Periode ist *XX Cygni*, welcher wahrscheinlich dem *δ Cephei*-Typus angehört; seine Periode beträgt $3^h 14{,}2^m$.

Die Ursache der Helligkeitsschwankungen der Veränderlichen dürfte nicht für alle diese Sterne die nämliche sein. Bei *Algol* kommen sie, wie Vogel und Scheiner um das Jahr 1890 spektroskopisch nachgewiesen haben, durch die Bewegung eines dunklen Begleiters um den Hauptstern zustande. Die photographischen Spektrenaufnahmen zeigen nämlich Linienverschiebungen von zeitlich derselben Periode wie der Lichtwechsel, so zwar, daß zu den um $^1/_4$ und $^3/_4$ Periode vom Minimum abliegenden Zeiten eine Annäherung bezw. Entfernung des Sternes angezeigt wird, indem im ersteren Falle die Linien eine Verschiebung nach dem blauen und im zweiten Falle nach dem roten Ende des Spektrums erfahren. Die Geschwindigkeit des hellen Sternes um den Schwerpunkt des aus ihm und dem dunklen Begleiter bestehenden Systems ergab sich zu 42 km in der Sekunde. Unter der Annahme gleicher Dichtigkeit beider Körper findet man ferner

den Durchmesser des hellen Körpers	= 1569000 km
den Durchmesser des dunklen Körpers	= 1177000 km
die Entfernung der Mittelpunkte der beiden Körper	= 5562000 km
die Masse des hellen Körpers	= 0,588 Sonnenmasse
die Masse des dunklen Körpers	= 0,248 Sonnenmasse

Der Durchmesser der Sonne beträgt, wie zum Vergleich hinzugefügt sei, 1 383 000 km.

Ein dunkler Begleiter dürfte wohl bei sämtlichen Algolsternen die Ursache des Lichtwechsels sein. Ist der Begleiter nicht vollständig dunkel, so muß nicht nur bei seinem Vortreten vor den Hauptstern, sondern auch bei seinem Dahintertreten eine Lichtschwächung eintreten. Ein solches sekundäres Minimum findet sich bei den Sternen vom Typus des Veränderlichen *β Lyrae*, welcher übrigens auch spektroskopisch als Doppelstern erkannt worden ist. Da bei diesem Stern jedoch keine längere Zeit konstant bleibende Maximalhelligkeit vorkommt, so ist man zu weiteren Annahmen gezwungen, etwa daß die beiden einander fast berührenden Körper infolge der Flutwirkung, welche sie aufeinander ausüben, von der Kugelgestalt stark abweichen.

Digitized by Google

Während zur Bestimmung der Bewegung *Algols* ein Vergleichspektrum nötig ist, um die Linienverschiebung nachzuweisen und zu messen, verrät sich die Doppelsternnatur eines aus zwei hellen Komponenten bestehenden spektroskopischen Doppelsternes durch eine periodische Verdoppelung seiner Spektrallinien, und nur, wenn außer der Bestimmung der relativen Geschwindigkeit beider Komponenten auch ihre Geschwindigkeit gegen die Erde gefunden werden soll, ist ebenfalls ein Vergleichspektrum nötig. Auffälligerweise gehören die Spektren der Algolsterne, soweit sie bekannt sind, alle der ersten Spektralklasse an.

Wenn die Zwischenzeiten zwischen den beiden Minima von ungleicher Länge sind, wie bei *Y Cygni*, so bietet sich die Annahme dar, daß die Körper sich in elliptischen Bahnen um ihren gemeinsamen Schwerpunkt bewegen, oder was auf dasselbe hinauskommt, daß die relative Bewegung des einen gegen den anderen eine Ellipse ist. Eine Aenderung der Periode des Lichtwechsels läßt sich dann weiter durch eine Drehung der großen Achse dieser Ellipse, wie sie durch die Störung seitens eines dritten Körpers hervorgebracht zu werden pflegt, ungezwungen erklären. Bei *Y Cygni* vollendet nach Dunér (em. Direktor der Sternwarte zu Upsala) die große Achse der Ellipse eine volle Umdrehung in 41 Jahren.

Fällt die von der Erde nach dem Doppelstern gerichtete Visierlinie nicht nahezu in die Ebene der Doppelsternbahn, so wird selbst eine nur teilweise Bedeckung des einen Sternes durch den anderen nicht eintreten, wie das z. B. bei *α Virginis* (*Spica*) der Fall ist, dessen Doppelsternnatur von Vogel durch Beobachtung einer periodischen Verschiebung der Spektrallinien entdeckt wurde.

Bei *β Aurigae* sind es zwei Komponenten von gleicher Helligkeit, welche um ihren gemeinsamen Schwerpunkt kreisen, ohne daß jedoch für uns einer vor den anderen tritt und dadurch Helligkeitsschwankungen hervorruft.

Von den in Figur 7 wiedergegebenen, auf dem Potsdamer Astrophysikalischen Observatorium aufgenommenen Spektren von *β Aurigae* entspricht das obere der Zeit, wo beide Sterne sich senkrecht zum Visionsradius bewegen, während das untere, die Spektrallinien verdoppelt zeigende Spektrum offenbar zu einer Zeit aufgenommen wurde, wo die Bewegung im Visionsradius erfolgte und für beide Komponenten verschieden gerichtet war. Die zwei besonders kräftigen Linien sind die Calciumlinien H und K.

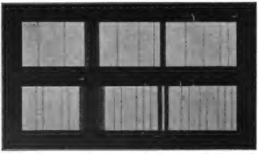


Fig. 7. Linienverdoppelung im Spektrum von *β Aurigae*.

Auch den in die Richtung der Gesichtslinie fallenden Teil der Bewegung des Schwerpunktes eines spektroskopischen Doppelsternes kann man aus den Messungen der Linienverschiebungen ableiten. — Bei *β Persei* (*Algol*) und *α Ursae minoris* (*Polarstern*), welch letzterer ebenfalls ein spektroskopischer Doppelstern ist, findet eine periodische Radialbewegung des Schwerpunktes in 1,9 bezw. 12 Jahren statt, was auf einen dritten Körper hinweist, um welchen der spektroskopische Doppelstern herumläuft.

Ferner haben sich auch die dem *δ Cephei*- und dem *ζ Geminorum*-Typus angehörenden Veränderlichen, so weit eine spektroskopische Untersuchung möglich war, als Doppelsterne erwiesen, deren Umlaufszeit gleich der Periode des Lichtwechsels ist. Da aber immer nur das Spektrum eines Sternes zu erkennen ist, so muß der andere der beiden Sterne mindestens sehr schwach sein. Das Helligkeitsmaximum fällt — anders wie bei den *Algol*- und *β Lyrae*-Sternen — mit der Zeit der größten auf uns zu gerichteten Geschwindigkeit zusammen, das Helligkeitsminimum mit der Zeit der größten von uns fort gerichteten Geschwindigkeit. Wie nun aber der Lichtwechsel zustande kommt, ist eine noch nicht befriedigend gelöste Frage.

Höchst auffällig ist die neuerdings bei 11 spektroskopischen Doppelsternen gefundene Tatsache, daß bei ihnen die Calciumlinien H und K eine konstante, die übrigen Linien aber eine veränderliche Geschwindigkeit ergeben. Ob jene konstante Geschwindigkeit gleich der des Systems ist, ist nicht sicher. Hartmann, welcher 1902 als erster auf dem Potsdamer Observatorium bei dem

schwach veränderlichen Stern *δ Orionis* jene Eigentümlichkeit der Calciumlinien nachwies, meinte, daß die letzteren nicht dem Spektrum des Sternes, sondern eines zwischen uns und dem Stern liegenden Nebels von Calciumdampf angehörten. Zehn von den elf Sternen sind Heliumsterne, der elfte, *ϑ Virginis*, zur Klasse Ia gehörig, hat ein ähnliches Spektrum.

Die Sterne vom *Mira*-Typus zeigen ein sehr charakteristisches, aus Absorptionsbanden und hellen, nach dem Violett etwas verschobenen Linien bestehendes Spektrum. Eine veränderliche Geschwindigkeit in Richtung der Gesichtslinie läßt sich jedoch nicht erkennen, so daß die Sterne dieses Typus als einfache angesehen werden müssen. Was die Ursache des Lichtwechsels anlangt, so könnte man an dunkle, auf der Oberfläche der Sterne auftretende Flecken denken, wie wir sie auf der Sonne als Sonnenflecken zu sehen gewohnt sind. Würden die Sonnenflecken, deren Auftreten bekanntlich an eine Periode von 11 Jahren gebunden ist, einen beträchtlicheren Teil der Sonnenoberfläche einnehmen, so würde unsere Sonne jedenfalls als ein veränderlicher Stern erscheinen, dessen Helligkeitsminimum in die Zeit der größten Fleckenhäufigkeit fiele.

Die Beobachtung der veränderlichen Sterne geschieht gewöhnlich mittels der Argelanderschen Stufenschätzungsmethode, nämlich durch Schätzung des Helligkeitsunterschiedes des Veränderlichen gegen benachbarte Sterne von nur wenig verschiedener Helligkeit in Stufen von etwa $^1/_{10}$ Größenklasse. Zur Ableitung der Periode des Lichtwechsels ist es wenigstens bei den Veränderlichen von kurzer Periode nötig, die Verschiedenheit der Zeiten zu beseitigen, welche der Lichtstrahl vom Stern zur Erde braucht, wenn diese einmal auf der einen, nach ihm hin liegenden, das andere Mal auf der anderen Seite von der Sonne steht. Man pflegt zu diesem Zweck die Beobachtungen auf den Sonnenmittelpunkt zu reduzieren, d. h. die Beobachtungszeiten so anzugeben, als ob die Beobachtungen vom Mittelpunkt der Sonne aus stattgefunden hätten.

4e) Neue Sterne. An die veränderlichen Sterne schließen sich engstens an die sogenannten neuen Sterne, die plötzlich an Stellen des Himmels auftauchen, wo früher nachweislich kein Stern zu sehen war. Natürlich ist der Stern nicht urplötzlich dahin versetzt worden, sondern nur durch eine über ihn hereingebrochene Katastrophe zum Aufleuchten gekommen. Sehen wir von älteren, namentlich bezüglich des Sternortes unsicheren Nachrichten ab, so verbleiben 19 seit 1572 entdeckte neue Sterne übrig, welche Zahl sich jedoch künftig etwas rascher vergrößern dürfte, nachdem in den Jahren 1893 bis 1899 von Mrs. Fleming auf der Harvard-Sternwarte in Cambridge, Mass., durch Vergleichung photographischer Aufnahmen nicht weniger als fünf neue Sterne entdeckt worden sind. Bisweilen kann man zweifelhaft sein, ob man es nur mit einem sehr unregelmäßig Veränderlichen oder mit einem neuen Stern zu tun hat.

Manche in früherer und auch in neuerer Zeit aufgetauchte neue Sterne gehören den wunderbarsten Himmelserscheinungen an, so die *Nova Cassiopeiae* von 1572, welche Tycho Brahes (1546 bis 1601, besonders auf der von ihm gegründeten Sternwarte Uranienburg auf Hven, zuletzt in Prag tätig) Interesse für die Astronomie erweckte, den *Sirius* an Helligkeit übertraf, von 1574 an aber nicht mehr zu sehen war. Anfangs von weißer Farbe wurde sie dann gelblich, später rot und zuletzt wieder weiß.

Der im Jahr 1600 entdeckte neue Stern *P Cygni* wurde von Kepler (1571 bis 1630) 1602 als Stern 3. Größe gesehen und erreichte, nachdem er 1621 verschwunden war, jene Größe 1655 wieder. Ein zweites Verschwinden fand 1660, ein weiteres Aufleuchten, jedoch nicht in dem Maße wie früher, 1665 statt, und seit 1677 bis auf den heutigen Tag ist er unverändert von 5. Größe, während sonst die neuen Sterne bald wieder unsichtbar zu werden pflegen.

Die *Nova Andromedae*, welche im Jahre 1885 im *Andromeda*-Nebel als Stern 7. Größe aufleuchtete und nach wenigen Monaten wieder verschwand, war jedenfalls kein sich nur auf jenen Nebel projizierender Stern, vielmehr scheint gerade zwischen neuen Sternen und Nebelmassen ein enger Zusammenhang zu bestehen, worauf auch die *Nova Aurigae* vom Jahre 1892 und die *Nova Persei* vom Jahre 1901 hinweisen. Der erstere, am 23. Januar 1892 von Anderson (Geistlicher in Edinburgh) entdeckte Stern hatte bereits, wie photographische Aufnahmen jener Gegend aus früheren Monaten zeigen, sein Maximum überschritten. Denn während er am 2. November 1891 jedenfalls schwächer als 11. und am 1. Dezember schwächer als 6. Größe war, da Sterne von diesen Helligkeiten sich auf den damals zufällig aufgenommenen Platten befinden, so war er am 10. Dezember von 5,4. und am 18. Dezember von 4,4. Größe. Nach seiner Entdeckung am 23. Januar 1892, wo er nur noch 5,2. Größe war, nahm er weiter ab und war am 26. April auch mit den stärksten Fernrohren nicht mehr zu sehen, bis er am 17. August 1892 als Stern 10. bis 11. Größe wieder auftauchte und zwar von einem Nebel umgeben. Später verschwand er wieder.

Die *Nova Persei*, welche seit Tychos

Digitized by Google

Zeiten jedenfalls die interessanteste Erscheinung dieser Art ist, wurde ebenfalls von Anderson, außerdem allerdings noch von 13 anderen Personen, in der Nacht vom 21. auf den 22. Februar 1901 entdeckt und zu 2,7. Größe geschätzt, nachdem sie zwei Tage vorher, wie eine photographische Aufnahme jener Gegend erweist, noch nicht 11. Größe gewesen war. Am 23. Februar erreichte sie die Helligkeit von *Capella*, also die 0,2. Größe und nahm vom 24. oder 25. Februar an wieder ab. Von Mitte März an, als sie bereits auf die 4. Größe gesunken war, erlitt sie Helligkeitsschwankungen von 3,5. bis 5,3. Größe, 5 Wochen lang, nahm dann weiter ab und blieb vom September 1901 konstant 6,6. Größe. Im August fand Wolf in Heidelberg photographisch, daß der Stern von einem Nebel umgeben sei, und im November konstatierte Perrine auf der Licksternwarte in Kalifornien, daß der Nebel sich in je 6 Wochen um 1′ weiter bewege.

Die Figuren 8 und 9, welche die photographischen Aufnahmen des Nebels um die *Nova* vom 20. September und 13. November 1901 wiedergeben, lassen diese Bewegung deutlich erkennen.

Da die Parallaxe des Sterns sich nur zu 0,″03 ergeben hatte und daraus, wenn man das Resultat nicht überhaupt als illusorisch betrachten will, eine mit der Lichtgeschwindigkeit vergleichbare fortschreitende Bewegung des Nebels sich ergeben würde, so stellte Kapteyn die Hypothese auf, daß diese Geschwindigkeit des Nebels nur scheinbar sei, daß wir in Wirklichkeit nur andere und andere Teile eines ruhenden Nebels sähen, die das von dem aufleuchtenden Stern sich ausbreitende Licht zu uns reflektierten und auf diese Weise uns sichtbar würden. Diese Hypothese stimmte recht gut zu der Annahme v. Seeligers (Direktor der Stern-

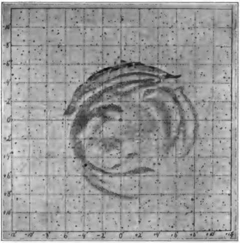


Fig. 8. Nebel um die *Nova Persei* am 20. September 1901.

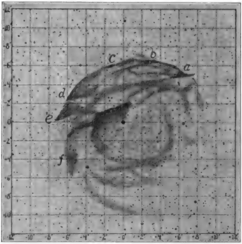


Fig. 9. Nebel um die *Nova Persei* am 13. November 1901.

Digitized by Google

warte zu München), daß das Aufleuchten eines neuen Sternes durch das Eindringen eines dunklen Weltkörpers in einen Nebel oder in kosmische Staubmassen verursacht werde, indem durch die Hemmung der Bewegung die für das Aufleuchten nötige Wärme erzeugt werde. Sehr gegen Kapteyns Ansicht spricht aber der Umstand, daß der Nebel (s. die Figuren 8 und 9) bei seiner Ortsveränderung seine durch einige gut begrenzte Ausläufer sehr charakteristische Gestalt und die Helligkeitsunterschiede der einzelnen Stellen beibehalten hat, was sich ungezwungen nur durch eine tatsächliche Fortbewegung der Nebelmassen erklären läßt. Die Nebelmassen wurden allmählich schwächer und schwächer und verschwanden dann ganz. Aus der beobachteten Verschiebung der Spektrallinien hat sich ergeben, daß die *Nova Persei* sich mit einer Geschwindigkeit von 5 km in der Sekunde von uns entferne.

Das Spektrum der neuen Sterne stellt sich als ein kontinuierliches dar, auf dem sich — abgesehen von dem Fall des in dem *Andromeda*-Nebel aufgetauchten neuen Sternes — helle und dunkle Linien abheben. Neben den meisten hellen (Emissions-) Linien kommen an deren brechbarerer Seite die Linien desselben Elementes auch dunkel vor. Der neue Stern im *Andromeda*-Nebel besaß bloß ein kontinuierliches Spektrum. Deutet man die Verschiebung der Spektrallinien als durch die Bewegung des Sternes verursacht, so kommt man auf Geschwindigkeiten von über 1000 km in der Sekunde. Wenn die Helligkeit der *Nova* abnimmt, so verschwindet das kontinuierliche Spektrum und das verbleibende Linienspektrum gleicht bezüglich der Lage der Linien dem der Nebelflecke, nur daß die Linien hier schmaler sind. Schließlich tritt wieder ein schwaches kontinuierliches Spektrum auf, so daß das *Nova*-Spektrum dem eines *Wolf-Rayet*-Sternes gleicht. Die Linien weisen auf das Vorkommen von Wasserstoff, Helium, Natrium, Calcium, Magnesium, Silicium hin. Im Spektrum der *Nova Geminorum* von 1912 sind auf der Bonner Sternwarte mit ziemlicher Sicherheit die radioaktiven Elemente Uran, Radium, Emanation und Helium nachgewiesen worden. Für die Erklärung mancher rätselhafter Erscheinungen bei den neuen Sternen wäre eine Bestätigung dieser Beobachtung natürlich von größter Wichtigkeit.

5. Physisch zusammengehörige Sterne. 5a) Doppelsterne und mehrfache Sterne. Die Sterne, die wir am Himmel sehen, stehen im allgemeinen so weit auseinander, daß keiner auf den anderen einen merklichen Einfluß ausüben dürfte. Dagegen muß es von vornherein als äußerst unwahrscheinlich angesehen werden, daß die im Fernrohr oft besonders nahe beieinander stehenden Sterne nur durch die Perspektive uns so benachbart erschienen, ohne in physischem Zusammenhang miteinander zu stehen. Chr. Mayer (1719 bis 1783, Leiter der Sternwarte zu Mannheim) suchte als erster durch Bestimmung des Rektaszensions- und Deklinationsunterschiedes der beiden Komponenten, wie die einzelnen Sterne eines Doppelsternsystems genannt werden, eine Aenderung ihrer gegenseitigen Lage im Laufe der Jahre nachzuweisen. Später machten sich um dieses Gebiet der Astronomie W. Herschel und besonders W. Struve (1793 bis 1864, Direktor der Sternwarte zu Dorpat und später zu Pulkowo) verdient, welch letzterer in drei Katalogen von etwa 3000 Doppelsternen die Entfernung der beiden Komponenten und die Richtung ihrer Verbindungslinie gab. Bei vielen dieser Sternpaare ist eine Aenderung der gegenseitigen Lage bis jetzt noch nicht wahrgenommen worden, da bei großen Entfernungen der Komponenten — die Struveschen Kataloge enthalten solche bis zu 32″ — die Umlaufszeit viele tausend Jahre betragen mag. Manche dieser Sternpaare sind vielleicht auch nur optische, nicht physische Doppelsterne. Dagegen hat man bei den engen Doppelsternen in vielen Fällen schon eine Bewegung der Komponenten umeinander konstatiert, immerhin aber nur bei 300 von 17000 jetzt bekannten Doppelsternen. In den letzten Jahrzehnten haben besonders die Astronomen Burnham, Aitken, Hussey auf der Licksternwarte in Kalifornien durch Auffindung vieler sehr enger Doppelsterne, von etwa 0,″1 Distanz, unsere Kenntnis in dieser Beziehung sehr vermehrt. So haben sie namentlich oft bei hellen Sternen sehr schwache Begleiter gefunden. Man möchte daher, namentlich auch im Hinblick auf die über 300 bis jetzt entdeckten spektroskopischen Doppelsterne, geneigt sein, die Doppelsternnatur bei den Himmelskörpern nicht als einen Ausnahmefall, sondern eher als die Regel anzusehen. Daß namentlich helle Sterne als Doppelsterne bekannt sind, dürfte von ihrer größeren Nähe herrühren. Die schwachen Sterne stehen im allgemeinen zu weit, als daß wir mit den jetzigen optischen Hilfsmitteln ihre Komponenten trennen könnten. Auch unser Sonnensystem mag früher, als der Planet Jupiter sich noch im glühenden Zustand befand, von anderen Sternen aus als Doppelsternsystem erschienen sein.

Da nach dem Newtonschen Gravitationsgesetz, das wir gerade auf Grund der an den Doppelsternen gemachten Erfahrungen für

die ganze Fixsternwelt als gültig annehmen dürfen, ein Doppelsternsystem nur dann als solches bestehen kann, wenn beide Körper sich um den gemeinsamen Schwerpunkt in Ellipsen bewegen, so muß die Verbindungslinie der beiden Sterne im Laufe der Zeit ihre Größe und Richtung ändern. Es ist nun die Aufgabe des Astronomen, aus diesen Aenderungen die Ellipse, welche einer der beiden Sterne um den anderen, als ruhend angenommenen Stern beschreibt, ihrer Lage und Gestalt nach zu bestimmen.

Kennt man von einem Doppelstern die Parallaxe, also seine Entfernung von uns, so kann man die halbe große Achse der Bahnellipse, welche ein Körper um den anderen beschreibt und welche man zunächst in Bogensekunden erhält, auch in Längeneinheiten ausdrücken. Als solche pflegt man die Entfernung der Erde von der Sonne zu nehmen. Weiter findet man dann aber auch, wenn man die Dimensionen und die Umlaufszeit des Doppelsternsystems mit den entsprechenden Größen unseres Sonnensystems vergleicht, wie viel Sonnenmassen die Masse des Doppelsterns gleichkommt, und mißt man nicht nur die relative Lage der Komponenten, sondern auch die Lage wenigstens einer derselben gegen einen benachbarten Fixstern, so erhält man noch die Lage des Schwerpunktes des Doppelsternsystems. Das Verhältnis aber der beiden Strecken, in welche durch den Schwerpunkt die Entfernung der beiden Komponenten geteilt wird, ist gleich dem der Massen der letzteren. Bis jetzt hat man bei 5 Doppelsternen diese Bestimmungen ausgeführt und die im folgenden Täfelchen zusammengestellten Werte erhalten, wobei p die Parallaxe, α die mittlere Entfernung der beiden Komponenten in Bogenmaß, a dieselbe in Einheiten der Entfernung der Erde von der Sonne, U die Umlaufszeit in Jahren und m_1 und m_2 die in Einheiten der Sonnenmasse ausgedrückten Massen der einzelnen Komponenten sind.

Name des Sternes	Größe der Komponenten	p	α	a	U	m_1	m_2
α Centauri	0 1	0,″75	17,″65	23,5	78,8	1,1	1,0
Sirius	—1,7 9	0,37	7,55	20,4	49,3	2,5	1,0
ξ Ursae majoris. . . .	4 5	0,17	2,51	14,8	59,8	0,4	0,5
ζ Herculis	3 6,5	0,17	1,35	7,9	34,5	0,3	0,1
70 Ophiuchi	4,5 6	0,17	4,56	26,8	87,9	1,4	1,1

Hieraus sowie aus den Bestimmungen der Gesamtmassen anderer Doppelsterne scheint der Schluß erlaubt, daß die Massen der Doppelsternkomponenten im allgemeinen von der Größenordnung der Sonnenmasse sind. Dagegen stehen die Massen keineswegs im Verhältnis der Helligkeiten, wie man es annähernd vielleicht erwarten sollte. So unterscheidet sich die hellere Komponente von *α Centauri* um eine Größenklasse von der schwächeren, sendet also 2,5mal so viel Licht aus wie diese, sie übertrifft sie aber kaum an Masse. Besonders auffallend ist der Unterschied zwischen dem Helligkeits- und dem Massenverhältnis bei *Sirius*. Der hellere Stern leuchtet etwa 20000mal so stark wie der schwächere, hat aber nur das 2,5fache seiner Masse. Wie wir unter 4d gesehen haben, besteht auch bei *Algol* und den anderen veränderlichen Sternen dieses Typus eine ebensolche Verschiedenheit zwischen Helligkeits- und Massenverhältnis.

Daß im Gegensatz zu diesen Resultaten die hellen roten Sterne nach den in 4a angestellten Erwägungen wahrscheinlich Massen besitzen, welche sehr viel größer sind als die Sonnenmasse, sei, obwohl dort bereits besprochen, doch hier nicht unerwähnt gelassen.

Die Entdeckung der Doppelsternnatur von *Sirius* und *Prokyon* verdanken wir den scharfsinnigen Untersuchungen Bessels, welcher aus den über längere Jahre sich erstreckenden Positionsbestimmungen dieser Sterne eine unregelmäßige Eigenbewegung derselben erkannte, für die er als Grund die Störungen durch einen Begleiter angab. Seine Behauptung wurde vielfach angefochten und erst nach seinem Tod als richtig erwiesen; im Jahre 1862 fand der Optiker A. G. Clark (1832 bis 1897 in Cambridgeport, Mass.) den Begleiter des *Sirius* als ein Sternchen von etwa 9. Größe in 10″ Abstand vom Hauptstern und im Jahre 1896 Schaeberle auf der Licksternwarte mit dem Refraktor von 91 cm Objektivöffnung und 18 m Brennweite den Begleiter des *Prokyon* als Sternchen 13. Größe in 4½″ Abstand. Die größte und kleinste Entfernung des *Sirius*-Begleiters vom Hauptstern beträgt 12″ und 3″, seine Umlaufszeit ist 49,3 Jahre, während die des *Prokyon*-Begleiters etwa 40 Jahre betragen dürfte. Wie bei *Sirius* sind auch bei anderen Doppelsternen die Bahnen meist stark exzentrisch.

Störungen durch einen dritten, uns jedoch nicht sichtbaren Körper sind es jedenfalls, welche bei den Doppelsternen

Ursae majoris und *ζ Herculis* eine immer eder hervortretende Abweichung der beobhteten Stellung der Komponenten von der rausberechneten verursachen. Wir brauchen s um so weniger zu bezweifeln, als wir auch ei- und noch mehrfache Sternsysteme nnen. Aus drei Komponenten besteht B. *ε Hydrae* und *ζ Cancri*, ebenso nach m in 4d Gesagten *β Persei* (*Algol*) und *Ursae minoris* (*Polarstern*). *ε Lyrae* ist ein ppelstern, dessen beide um 208″ auseinder stehende Komponenten wieder Doppelerne von 3″ und 2″ Abstand sind. Ebenso d die beiden Komponenten des visuellen ppelsterns *α Geminorum* wieder spektropische Doppelsterne.

Die Verteilung der Doppelsterne an der immelskugel ist gleich der der Sterne erhaupt, was uns wieder darauf hinweist, ß wir in den Doppel- und mehrfachen ernen wohl kaum einen Ausnahmefall r Sternbildung zu erblicken haben.

Fig. 10. Der große Sternhaufen im *Herkules*.

5b) Sternhaufen; Gruppen weit ausander stehender Sterne. Auch steme von Hunderten und Tausenden zelner Sterne finden wir häufig am Himmel, sogenannten Sternhaufen, die vergleich- unserem Sonnensystem, nur viel komierter gebaut, eine Welt für sich im ßen Fixsternsystem bilden. Nur nach n Rand des Sternhaufens hin können wir zelne Sterne unterscheiden, nach innen zu l die Sterne zu einem unauflösbaren äuel zusammengedrängt, so daß, wenn überdies die Sterne von äußerst geringer Helligkeit, etwa von 15. oder 16. Größe sind, man die Sternnatur des Haufens gar nicht mehr erkennen kann.

Einen schönen Anblick gewährt der in Figur 10 abgebildete große Sternhaufen im *Herkules*, einen noch schöneren der schon mit bloßen Augen als kometenartiger Fleck von der Helligkeit eines Sternes 4,5. Größe sichtbare, einen Durchmesser von 15′ besitzende Sternhaufen *ω Centauri* auf der südlichen Halbkugel.

Bei Besprechung der Veränderlichen unter 4d ist schon darauf hingewiesen, daß in den Sternhaufen zahlreiche Veränderliche gefunden worden sind; so haben sich bei *ω Centauri* von 3000 Sternen 128 als veränderlich herausgestellt.

Ein mit guten Augen in sieben einzelne Sterne bereits zu trennender Sternhaufen ist die bekannte Plejadengruppe. Das Fernrohr läßt natürlich sehr viel mehr Sterne erkennen. Eine Vergleichung der von Bessel vorgenommenen Ausmessung dieses Sternhaufens mit den 50 und 65 Jahre später von Elkin auf dem Yale Observatory in New Haven, Conn., ausgeführten zeigte, daß von den 51 den drei Ausmessungen gemeinsamen Sternen 45 die gleiche Eigenbewegung besitzen wie *Alkyone*, der hellste, mittlere Plejadenstern, während 6 Sterne still stehen, sich also nur auf jene Stelle des Himmels projizieren, ohne dem System der Plejaden anzugehören. Auch die Bewegung in der Gesichtslinie hat sich bei jenen Sternen, soweit sie daraufhin untersucht werden konnten, als nahe gleich herausgestellt.

Dem Liebhaber der Astronomie wohlbekannte Sternhaufen sind die *Praesepe* oder *Krippe* im Sternbild des *Krebses* und die *Hyaden* im *Stier*.

Eine über 200 Quadratgrad sich ausbreitende Gruppe von Sternen, zu denen auch mehrere Hyadensterne gehören, streben wie L. Boß (Direktor des Dudley Observatory zu Albany, N. Y.) aus ihren Eigenbewegungen gefunden, nach einem bestimmten Punkt

Digitized by Google

des Himmelsgewölbes hin. Figur 11 gibt die Richtung und Größe der Eigenbewegungen, die letztere für 50 000 Jahre, an. Die Konvergenz nach R.A. = 92°, Dekl. = + 7° ist nur eine scheinbare, durch die Perspektive vorgetäuschte, in Wirklichkeit laufen die 41 Sterne parallel. Der Durchmesser des mächtigen Sternschwarmes beträgt nach Boß über 30 Lichtjahre.

Ebenso zeigen sich auch die Eigenbewegungen der Sterne *β, γ, δ, ε, ζ Ursae majoris*, die 9 bis 13" im Jahrhundert betragen, nach einem Punkt des Himmelsgewölbes, R.A. = 309°, Dekl. = —42°, gerichtet. Auch die Radialgeschwindigkeiten stimmen befriedigend überein, so daß man die Bewegungen dieser Sterne im Raum als annähernd gleich und gleichgerichtet ansehen muß. Aber selbst die weit davon entfernten Sterne *Sirius*, *β Aurigae* und *α Coronae borealis*, sowie vielleicht noch einige andere, deren Radialgeschwindigkeit jedoch daraufhin noch nicht untersucht worden ist, dürften diesem System angehören.

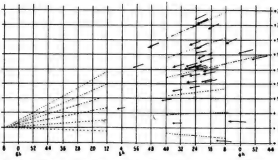


Fig. 11. Gruppe von Sternen im *Stier* mit gemeinsamer Bewegungsrichtung.

Nach Eddington (Astronom der Greenwicher Sternwarte) haben auch 16 Heliumsterne im *Perseus* eine gleiche Bewegung.

Die in den letzten Jahren aufgestellte, großes Aufsehen erregende Behauptung Kapteyns, daß zwei große Sternströme in der Ebene der Milchstraße in entgegengesetzter Richtung durcheinander hindurch fluteten, hat sich als nicht haltbar herausgestellt.

5c) Nebel. Wenn die Sterne eines Sternhaufens von so geringer Größe sind, daß sie nicht mehr als solche erkannt werden können, so macht der Sternhaufen den Eindruck eines Nebels. Bisweilen verrät uns das kontinuierliche, Absorptionslinien zeigende Spektrum, daß wir es mit feurigflüssigen oder doch im Zustande größerer Dichte befindlichen, von einer Gashülle umgebenen Körpern zu tun haben, oft aber deutet das Spektrum in der Tat darauf hin, daß ein gasförmiges Gebilde vorliegt; es besteht in diesem Fall aus hellen Linien auf sehr schwachem, kontinuierlichen Untergrund, von welchen Linien die beiden im Grün gelegenen mit den Wellenlängen 5007 und 4959 sich durch ihre Intensität auszeichnen. Vermutlich gehören sie einem auf der Erde nicht vorkommenden Element, welchem man den Namen Nebulium gegeben hat, an. In der Regel sind auch die Wasserstofflinien F und Hγ von den Wellenlängen 4861 und 4341 vorhanden. In sehr vielen Fällen läßt uns wegen der Schwäche des Objektes das Spektroskop im Stich, so daß wir über die Natur desselben keine sichere Entscheidung treffen können. Aus diesem Grunde pflegen Sternhaufen und Nebel gemeinsam in den Nebelkatalogen aufgeführt zu werden.

Mit der Vervollkommnung des Fernrohres hat die Zahl der bekannten Nebel natürlich

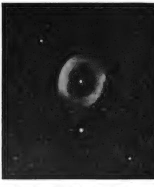


Fig. 12. Ringnebel in der *Leier*.

image
not
available

image
not
available

um so größer, je weiter sie von der Milchstraße abstehen, in der Nähe ihrer Pole also am größten. Eine starke Anhäufung von Nebeln und Sternhaufen findet in den Magelhaensschen Wolken statt.

Bis vor wenigen Jahrzehnten hat man die Nebel für außerhalb unseres Fixsternsystems liegende Gebilde gehalten, welche im Begriff seien, sich zu selbständigen Fixsternsystemen zu entwickeln. Diese Meinung mußte man jedoch aufgeben, als besonders durch die Photographie ein Zusammenhang von Fixsternen und Nebeln erwiesen wurde. Helle Sterne, z. B. die *Maja* und *Merope* in den *Plejaden* schließen sich an Nebelmassen an, aus denen sie gebildet zu sein scheinen, und über der ganzen Plejadengruppe liegt noch ein, nur bei mehrstündiger Exposition auf der photographischen Platte erscheinender Nebelschleier, der jedenfalls das Material für diese Gestirne hergegeben hat; die *Nova Andromedae* von 1885, die *Nova Aurigae* von 1892 und die *Nova Persei* von 1901 haben in Beziehung zu Nebeln gestanden, die Geschwindigkeit der Nebel in der Gesichtslinie hat sich bei 14 solcher Gebilde von gleicher Größenordnung ergeben wie bei den Fixsternen — die Geschwindigkeit senkrecht zur Gesichtslinie hat wegen der Unsicherheit der Positionsbestimmung dieser diffusen Objekte bisher noch nicht bestimmt werden können — der *Orion*-Nebel entfernt sich mit der gleichen Geschwindigkeit von 17 km von uns, welche auch in ihm liegenden Sternen zukommt; es treten ferner, wie Scheiner aus photographischen Aufnahmen des *Orion*-Nebels gefunden hat, Wiederholungen gewisser Stellungen von Sternen zu Nebelpartien auf, indem z. B. an jedem Ende von zwei halbkreisförmigen Nebelstreifen sich ein Stern befindet; alles das deutet auf einen Zusammenhang zwischen Sternen und Nebeln hin, mit anderen Worten: der von unserem Fixsternsystem eingenommene Raum enthält über weite Gebiete sich erstreckende Nebelmassen. Einige Astronomen halten allerdings, worauf unter **6.** zurückzukommen sein wird, an der Ansicht fest, daß wenigstens gewisse Sternhaufen und Nebel, z. B. die Spiralnebel, außerhalb des Fixsternsystems liegen.

6. Der Bau des Universums. Eines der höchsten Ziele der Astronomie ist die Kenntnis vom Bau des Universums. Nun kennen wir zwar mit befriedigender Genauigkeit die Verteilung der Sterne, Sternhaufen und Nebel an der Himmelskugel, wir kennen ferner das Verhältnis der den einzelnen Größen- und den einzelnen Spektralklassen angehörigen Sterne, wir kennen von 10000 Sternen ihre jährliche Bewegung an der Himmelskugel und von 1700 Sternen ihre Geschwindigkeit in der Gesichtslinie, aber nur von 200 Sternen ist bisher die Parallaxe gemessen, die Entfernung also bekannt. Durchschnittswerte der Parallaxe für die Sterne der verschiedenen Größenklassen hat, wie in **3a** angegeben, Kapteyn abgeleitet. Dabei ist aber stillschweigend vorausgesetzt, daß den Sternen jeder einzelnen Größenklasse eine bestimmte Entfernung eigentümlich ist, von der nur selten größere Abweichungen vorkommen, was von vornherein jedoch keineswegs feststeht.

Wegen der verhältnismäßig geringen Anzahl der direkt bestimmten Parallaxen ist man in der Tat genötigt, eine Hypothese über die Beziehung zwischen Sternhelligkeit und Entfernung zu machen, um die Anordnung der Sterne im Raume abzuleiten, wenn man nicht, wie anfänglich W. Herschel, für diese selbst gleich eine Hypothese aufstellen will. Herschel suchte nämlich anfangs unter der Annahme einer gleichmäßigen räumlichen Verteilung der Sterne die Ausdehnung des Fixsternsystems zu bestimmen. Er zählte zu diesem Zweck die Sterne, welche er im Gesichtsfeld seines großen Fernrohres erblickte, das er, um gleichsam Stichproben zu machen, nach mehreren Tausend Stellen des Himmels richtete. Sah er nach der einen Richtung achtmal so viel Sterne als nach der anderen, so schloß er, daß sich nach jener Richtung das Sternsystem doppelt so weit ausdehne als nach der letzteren, denn bei gleich dichter Verteilung muß die Anzahl der Sterne, welche sich in dem vom Fernrohr überblickten kegelförmigen Raum bis zu einer gewissen Entfernung befinden, dem Rauminhalt des bis zu dieser Entfernung reichenden Kegels proportional sein. Die verschiedene Helligkeit der Sterne blieb bei der Annahme der gleichmäßigen räumlichen Verteilung ganz unberücksichtigt. Ferner war es ein Mangel, der dieser Annahme anhaftete, daß nach ihr die Sterne in der Mitte nicht dichter standen als an den Grenzen, wo die Besetzung des Raumes mit Sternen auf einmal aufhörte, während doch die Sternhaufen, die Herschel für selbständige, außerhalb des unserigen liegende und ihm gleichwertige Fixsternsysteme hielt, nach der Mitte eine Verdichtung zeigten. Daher ließ Herschel seine erste Hypothese fallen und nahm die Helligkeit der Sterne zum Maßstab für ihre Entfernung, indem er die Annahme gleicher absoluter Leuchtkraft sämtlicher Sterne machte, eine Annahme, die abgesehen von ihrer sonstigen Unwahrscheinlichkeit durch das verschiedene spektroskopische Verhalten der Sterne widerlegt wird.

Auch W. Struve ging bei seinen Unter-

suchungen über die Anordnung der Sterne von dieser Hypothese aus. Da ein Stern irgendwelcher Größenklasse uns nur 0,4mal so viel Licht zusendet als ein Stern der vorhergehenden Größenklasse, so muß er, gleiche Leuchtkraft vorausgesetzt, 1,6mal so weit entfernt sein als letzterer. Aus der Größenklasse, bis zu welcher Herschel mit seinem 20füßigen Teleskop kommen konnte, ließ sich so berechnen, daß die schwächsten mit dem Fernrohr sichtbaren Sterne 664mal so weit entfernt seien als die Sterne 1. Größe. Sollten aber bei gleicher Verteilung der Sterne im Raum ihre Entfernungen überall dieselben sein, wie sie sich für die helleren Sterne ergaben, so hätte Herschel etwa 30mal so viel Sterne mit dem Fernrohr sehen müssen, als es nach seinen „Sterneichungen“, wie er die stichprobenartigen Sternabzählungen nannte, der Fall war. Struve schloß daher auf eine Absorption des Lichtes im Weltenraume, die in der Tat wohl auch statthaben mag, durch die höchst wahrscheinlich nicht zutreffenden, am allerwenigsten gleichzeitig zutreffenden Annahmen gleicher Leuchtkraft und gleichmäßiger Verteilung der Sterne, auf welche sich Struve hier stützt, aber nicht als erwiesen gelten kann. Besser wird man umgekehrt sagen: Die Zunahme der Zahl der schwachen Sterne erfolgt zu langsam, als daß man eine gleichmäßige räumliche Verteilung und gleiche Leuchtkraft der Sterne annehmen könnte. Auch zwischenliegende dunkle Nebel- oder Staubmassen wird man wohl nicht für das ungenügend rasche Anwachsen der Sternhäufigkeit bei den schwächeren Größenklassen verantwortlich machen wollen, um die beiden von vornherein unwahrscheinlichen Hypothesen gleichzeitig zu retten.

Als ein gesichertes Resultat der Sternabzählung hat sich ergeben: Nach der Milchstraße nimmt die Zahl der Sterne jeder Größenklasse zu; bei den helleren Sternen allerdings kaum merklich, bei den schwächeren aber in einem um so stärkeren Verhältnis, je geringer die Helligkeit ist. Die hellen Sterne bis zur 6. Größenklasse sind weniger zur Milchstraße als zu einem diese in der *Cassiopeia* und im *südlichen Kreuz* unter 19° schneidenden Kreise symmetrisch gelegen.

Die große Zahl der schwachen Sterne in der Milchstraße mag zum Teil auf eine größere Sterndichte jener Gegenden hinweisen, großenteils aber ist sie gewiß bedingt durch eine bedeutendere Ausdehnung in jener Ebene, so daß wir unserem Sternsystem eine linsenförmige Gestalt zuerkennen werden.

Während W. Herschel und unter den heutigen Astronomen z. B. See, Professor am U. S. Naval Observatory in Mare Island, Cal., diesem linsenförmigen Körper einen Durchmesser in seiner Mittelebene von einigen Millionen Lichtjahren gibt, kommt v. Seeliger unter der Annahme, daß die Sterne der verschiedenen Größenklassen in unserem Fixsternsystem überall in demselben Verhältnis gemischt vorkommen und daß es Sterne von etwa 1000mal so großer Leuchtkraft wie die Sonne kaum gebe, zu dem Resultat, daß jener Durchmesser nur gegen 10000 Lichtjahre betrage, die Zahl der Sterne des nach außen ziemlich scharf abgegrenzten Haufens aber einige Zehner von Millionen.

Was den Bau des Universums mehr im einzelnen anbelangt, so hat Stratonoff, Astronom der Taschkenter Sternwarte, gefunden, daß die Verteilung der Sterne der verschiedenen Größenklassen eine verschiedene ist. Für die Sterne bis 8,5. Größe bildet die Milchstraße noch nicht die Symmetrieebene, auch sind die Gegenden um die Pole der Milchstraße noch nicht die sternärmsten für diese Größenklassen. Auf der nördlichen Halbkugel besitzt die Milchstraße drei wolkenartige Sternanhäufungen, die sich mit ihren Rändern berühren, nämlich im *Schwan*, im *Fuhrmann* und in den *Zwillingen* bis zum *Einhorn*. Unsere Sonne würde der ersten dieser stellaren Wolken angehören.

Nach dem niederländischen Astronomen Easton in Amsterdam ist die Milchstraße von spiraligem Bau; ihr Zentrum, von dem die verschiedenen, nicht alle in einer Ebene liegenden Aeste ausgehen, wird von uns aus in der Richtung nach dem *Schwan* hin gesehen; diesem hellen Teil der Milchstraße sind wir näher als dem gegenüberliegenden durch den *Großen Hund* und das *Einhorn* gehenden, viel weniger hellen Teil.

Figur 15 gibt eine schematische Ansicht vom Bau unseres Fixsternsystems nach Easton; der Mittelpunkt S soll den Sonnenort bezeichnen.

Ob der spiralige Bau unseres Fixsternsystems, wenn er wirklich richtig erkannt sein sollte, uns ein genügender Grund sein muß, die Spiralnebel als besondere, der unserigen gleiche Fixsternwelten anzusehen, wie es von manchen Astronomen geschieht, ist gewiß noch sehr fraglich. Man wird den Spiralnebeln nicht gern eine Sonderstellung einräumen wollen, nachdem man die übrigen Nebel als innerhalb unserer Fixsternwelt liegend erkannt hat. Und ein gleiches gilt von den Sternhaufen. Es hindert nichts anzunehmen, daß die Struktur des großen Ganzen auch die Struktur einzelner Teile sei. Wohl mögen, durch weite Zwischenräume von unserem Fixsternsystem getrennt, noch

Digitized by Google

andere solche Systeme vorkommen, von denen uns aber bisher keine Kunde geworden ist.

Der Bau des Weltalls ist offenbar ziemlich verwickelt, erscheint uns namentlich so, die wir mitten in dem Gewirre stehen, so

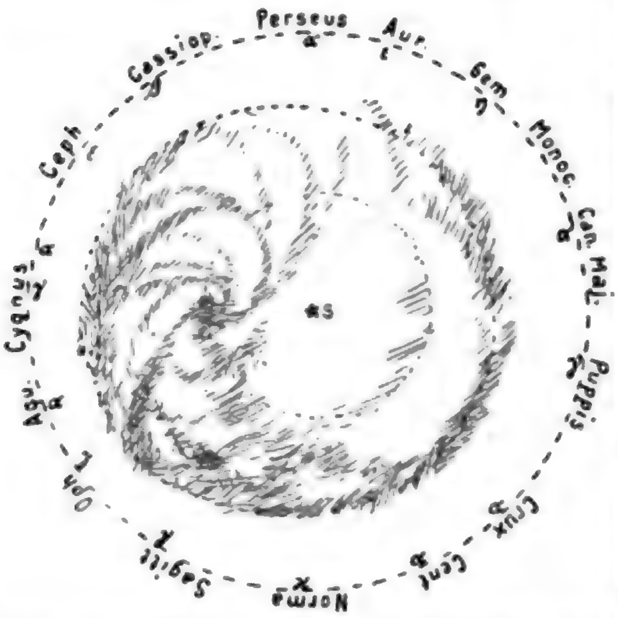


Fig. 15. Struktur des Fixsternsystems nach Easton.

daß uns der Ueberblick erschwert ist. Noch stehen wir am Anfang unserer Erkenntnis, einen wesentlichen Fortschritt dürfen wir erwarten durch umfangreiche Parallaxenbestimmungen, wie sie jetzt nach zwei Methoden geplant werden, nämlich für hellere Sterne durch Beobachtung von Meridiandurchgängen mit dem die persönliche Gleichung nahezu ausschaltenden unpersönlichen Repsoldschen Mikrometer und für schwächere Sterne durch die von Kapteyn vorgeschlagene und auch mehrfach schon mit Erfolg ausgeführte photographische Methode, bei der dieselbe Platte im Laufe eines Jahres dreimal, ohne mittlerweile entwickelt zu werden, exponiert wird, so daß die stärkeren Parallaxen und Eigenbewegungen durch die von den übrigen abweichende Stellung der drei Sternpunkte leicht herausgefunden werden kann. Dann wird ein fester Boden für die Erforschung des Baues unserer Fixsternwelt geschaffen sein.

Von hier aus wird man auch vielleicht einmal imstande sein, etwas Sicheres über die Entwickelung des Universums zu sagen. Jedenfalls dürfen wir in unserem Fixsternsystem nicht eine fertige, auf dem Höhepunkt ihrer Entwickelung stehende Welt sehen. Die Sterne befinden sich in den verschiedensten Entwickelungsstadien, zum Teil in höchster Weißglut, zum Teil in Rotglut, zum Teil endlich im Zustande der Erstarrung, ohne alles Leuchtvermögen, in seltenen Fällen, gelegentlich der Bedeckung eines hellen Sternes, uns überhaupt wahrnehmbar. Die Frage, ob die Entwickelung im Sinne einer Erkaltung oder einer Temperaturzunahme der Himmelskörper erfolgt, dürfte dahin zu beantworten sein, daß bald das eine, bald das andere der Fall sein mag, je nachdem der Himmelskörper frei im Weltenraum steht oder ob er um ihn lagernde Nebelmasse an sich zieht, in welchem Maß seine Zusammenziehung der Temperaturabnahme durch Ausstrahlung entgegenwirkt, ob chemische Verbindungen auf ihm unter Wärmeentwickelung zerfallen usw.

Vielleicht verdichten sich nicht bloß Nebel zu Sonnen, sondern es lösen sich auch Sonnen oder erkaltete Körper, wie es bei der Erscheinung neuer Sterne der Fall sein mag, in Nebel auf. Das Universum wird sich immer im Zustande des Werdens, der Veränderung befinden, genau so wie heute.

Ein so langer Bestand unserem Fixsternsystem aber auch gewährleistet sein mag, so muß es doch nach unseren heutigen physikalischen Anschauungen durch seine Ausstrahlung in den Weltenraum an Energie verlieren. Daß es, in welcher Form immer, seit Ewigkeit bestanden hat, werden wir wohl annehmen müssen. Wenn die Energie des Systems aber stetig abnimmt, so muß sie in früherer Zeit jeden noch so hohen Wert einmal gehabt haben. Um sowohl diese Folgerung zu vermeiden, als auch an den dauernden Verlust von Energie nicht glauben zu müssen, kann man, wie manche Physiker es tun, die Annahme machen, die von unseren Fixsternen ausgehenden Strahlen gingen nicht in den unendlichen Weltenraum hinaus, sondern erführen an der Grenze des unser Fixsternsystem erfüllenden Aethers eine Reflexion, oder man kann den Raum als endlich annehmen, ihm eine Krümmung zuschreiben, so daß die Strahlen wieder zum Ausgangspunkt zurückkehren.

Literatur. *Populäre Werke:* ***Newcomb-Engelmann****, Populäre Astronomie, herausgegeben von Kempf. 1911.* — ***Newcombs*** *Astronomie für jedermann, bearbeitet von Schorr und Graff. 1910.* — ***Littrow-Weiss****, Wunder des Himmels. 1897.* — ***W. Meyer****, Das Weltgebäude. 1898.* — ***Scheiner****, Populäre Astrophysik. 1908.* — *Ueber die Koordinatensysteme an der Himmelskugel, Präzession, Parallaxe, Aberration, Eigenbewegung s. die Lehrbücher der sphärischen Astronomie von* ***Brünnow, Herr-Tinter, Chauvenet, de Ball.*** — *Spezialwerke:* ***Müller****, Die Photometrie der Gestirne. 1897.* — ***Scheiner****, Die Spektralanalyse der Gestirne. 1890.* — ***Kobold****, Der Bau des Fixsternsystems. 1906.* — ***See****, Researches on the Evolution of Stellar Systems. 1896 und 1910.* —

Digitized by Google

Einige grundlegende Arbeiten: **W. Herschel**, *Philos. Trans., Vol.* 75, 79, 92, 107, 107. — **Seeliger**, *Räumliche Verteilung der Fixsterne. Abh. d. bayer. Ak. d. Wiss. 1898 und 1909.* — **Derselbe**, *Räumliche Verteilung der Sterne im schematischen Sternsystem. Sitzber. d. bayer. Ak. d. Wiss. 1911.* — **Anding**, *Kritische Untersuchungen über die Bewegung der Sonne durch den Weltraum. 1901 und 1910.* — **L. Boss**, *Convergent of a moving cluster in Taurus. Astron. Journ.* 26. — **B. Boss**, *Community of Motion among Several Stars of Large Proper-Motion. Astron. Journ.* 27. — **Derselbe**, *Systematic Proper-Motions of Stars of Type B. Astron. Journ.* 26. — **Kapteyn**, *Die mittlere Geschwindigkeit der Sterne, die Quantität der Sonnenbewegung und die mittlere Parallaxe der Sterne von verschiedener Größe. Astr. Nachr., Bd.* 146. — **Derselbe**, *On the Distribution of Cosmic Velocities. Publ. Astr. Labor. Groningen, Nr.* 5. — **Derselbe**, *On the mean Parallax of Stars of determined Proper-Motion and Magnitude. Publ. Astr. Labor. Groningen, Nr.* 8. — **Eddington**, *Stellar Distributions and Movements. The Observatory, 1911.*

O. Knopf.

Fizeau

Armand Hippolyte Louis.

Geboren am 23. September 1819 in Paris, gestorben am 18. September 1896 in Venteuil. Seit 1860 war er Mitglied der Akademie in Paris, seit 1878 Mitglied des Längenbureaus. Seine bekanntesten Forschungen beschäftigen sich mit der Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichts, wie überhaupt der Untersuchung von Licht- und Wärmestrahlen; gemeinsam mit Foucault veröffentlichte er Messungen im Ultrarot. 1864 konstruierte er ein Dilatometer und unternahm damit Messungen der thermischen Ausdehnung der Körper, insbesondere der Kristalle.

E. Drude.

Flächenmessung.

1. Ausmessung krummlinig begrenzter ebener Figuren: a) Summation der Ordinaten. b) Simpsonsche Regel. c) Auszählen. 2. Planimeter: a) Allgemeines kinematisches Prinzip. b) Polarplanimeter. c) Schneidenplanimeter Prytz. 3. Ausmessung krummer Oberflächen.

1. Ausmessung krummlinig begrenzter ebener Figuren. 1a) Summation der Ordinaten. Der allgemeine Fall einer krummlinig begrenzten Fläche erfordert (sofern wir zunächst vom Gebrauch von Planimetern absehen) die Erledigung folgender spezielleren Aufgabe:

Wir legen ein gewöhnliches cartesisches xy-Koordinatensystem zugrunde und es sei zwischen zwei Punkten A und B (s. Fig. 1) eine Kurve gegeben. Sei es analytisch durch eine Gleichung $y=f(x)$, durch eine größere Anzahl von Punkten, oder fertig gezeichnet. Sind x_a und x_b die Abszissen der Punkte A und B, so entsteht zunächst die Aufgabe, den Flächeninhalt J zu bestimmen, der von der Kurve, der x-Achse und den beiden Ordinaten $x=x_a$ und $x=x_b$ eingeschlossen wird.

Ist $y=f(x)$ die Gleichung der Kurve, die stets als vorhanden angenommen werden kann auch wenn die Kurve anders gegeben ist, so ist die mathematische Formulierung des Problems die Auswertung des Integrals:

$$J=\int_{x_a}^{x_b} f(x).dx$$

(wobei f(x) im Intervall A bis B als eindeutig angenommen ist).

Es liegt zunächst nahe, das Integral durch eine endliche Summe zu approximieren.

Dazu wird das Intervall x_a bis x_b in eine gerade Anzahl n gleicher Teile von der Länge h geteilt. Die Abszissen der Endpunkte der Teilintervalle seien $x_a\ x_1\ x_2 \ldots x_{n-2}\ x_{n-1}\ x_n$, wenn der Einfachheit halber für x_b jetzt x_n geschrieben wird. Die zugehörigen Ordinaten der Kurve an den Stellen $x_a\ x_1 \ldots x_n$ seien $y_0\ y_1\ y_2 \ldots y_{n-1}\ y_n$.

Bezeichnet man nun mit $\varDelta x$ ein Intervall von der Länge 2h, so erhält man eine Approximation für den Flächeninhalt J, wenn man der Reihe nach die Rechtecke addiert, deren Basis gleich $\varDelta x$ und deren Höhe gleich der Ordinate in der Mitte der Basis $\varDelta x$ ist. Man hat die Summe zu bilden:

$$J_1=\varDelta x . \{y_1+y_3+y_5+ - y_{n-3}+y_{n-1}\}$$

wobei also nur über die y_i mit ungeradem Index i zu summieren ist.

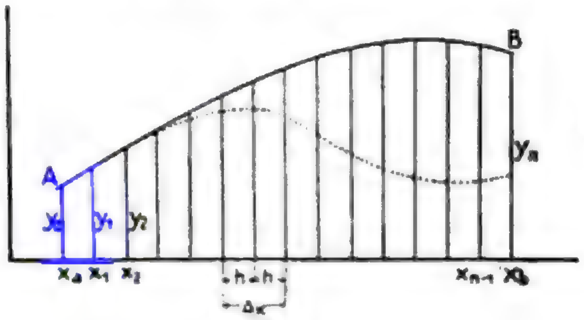


Fig. 1.

Der so erhaltene Näherungswert J_1 ist offenbar zu groß (zu klein), wenn die Kurve

Digitized by Google

ischen den Punkten A und B dauernd :h unten (oben) konkav gestaltet ist.

Wechselt die Kurve in dem Intervall :r das Vorzeichen der Krümmung (s. die nktierte Kurve zwischen A und B in :. 1), so kann diese Näherung J_1 recht iau sein. Natürlich steigt die Genauigkeit t der Anzahl n der Teilintervalle.

1b) Simpsonsche Regel. Die als mpsonsche Regel bezeichnete Methode iert auf dem Gedanken — eine Eintei- g in n Teilintervalle wie oben voraus- etzt —, die gegebene Kurve durch Stücke ı Parabelbögen zu ersetzen, und den rvon umschlossenen Flächeninhalt J_2 ɜng auszuwerten.

Durch einen Parabelbogen ersetzt wird esmal ein Teil der Kurve zwischen ɜi aufeinanderfolgenden Punkten mit Ab- ssen von geradem Index, also über der sis der vorher benutzten Rechtecke. B. zwischen den Punkten P $(x_4\ y_4)$ und $(x_6\ y_6)$.

Die Parabel soll hierbei folgende Bedin- ıgen erfüllen:

1. Ihre Achse soll parallel der y-Achse ı. Ihre Gleichung hat daher die Form:

$$\eta = a + bx + cx^2.$$

Die Analogie mit der Entwickelung einer ıktion in eine Potenzreihe wird dabei ıdent.

2. Die Parabel soll durch die Kurven- ıkte $(x_4\ y_4)$ und $(x_6\ y_6)$ hindurchgehen. Ferner auch durch den mittleren Kurvenpunkt $(x_5\ y_5)$. Dadurch ist sie bestimmt, hat allerdings an den drei Punkten eine etwas andere Rich- tung als die gegebene Kurve.

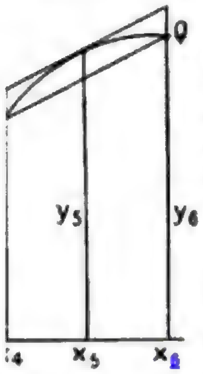


Fig. 2.

Der Flächeninhalt unter dem Parabelbogen PQ (s. Fig. 2) besteht nun erstens aus dem Inhalt des Tra- pezes, das aus der Basis $\Delta x = x_6 - x_4$ und der Sehne PQ gebildet wird. Bezeichnen wir diesen Inhalt des „Sehnen- ɔezes" mit S', so ist

$$S' = \Delta x . \frac{1}{2} . (y_4 + y_6).$$

Tangente an die Parabel im Punkte y_5) ist der Sehne PQ parallel und $\Delta x . y_5$ " ist der Inhalt des „Tangententrapezes", unten durch Δx und oben durch diese ıgente begrenzt wird.

Die Differenz T' — S' ist der Inhalt des ɲen Parallelogramms zwischen Sehne : Tangente und $^2/_3$ hiervon ist nach einem bekannten Satze das unter dem Parabelbogen liegende Flächenstück. Um dieses Flächen- stück ist das Sehnentrapez zu vermehren, um den gesamten zwischen dem Parabelbogen und der x-Achse liegenden Flächenstreifen zu erhalten. Dessen Inhalt wird also:

$$J_2' = S' + {}^2/_3 . (T' - S').$$

Um den gesamten Flächeninhalt J_2 zu er- halten, der von den einzelnen Parabelbögen begrenzt wird, sind die einzelnen Sehnen- und Tangententrapeze der Teilintervalle zu summieren.

Die Summe S der Sehnentrapeze wird:

$$S = \Delta x . \left\{ \frac{y_0 + y_2}{2} + \frac{y_2 + y_4}{2} + \ldots + \frac{y_{n-4} + y_{n-2}}{2} + \frac{y_{n-2} + y_n}{2} \right\}$$

d. h.

$$S = \Delta x . \left\{ \frac{y_0}{2} + y_2 + y_4 + \ldots + y_{n-4} + y_{n-2} + \frac{y_n}{2} \right\}$$

Die Summe T der Tangententrapeze wird:

$$T = \Delta x . \{ y_1 + y_3 + \ldots y_{n-3} + y_{n-1} \}.$$

Der Inhalt J_2 wird:

$$J_2 = S + {}^2/_3 . (T - S)$$

Meistens findet man den hieraus hervor- gehenden Ausdruck:

$$J_2 = \frac{\Delta x}{3} . (S + 2T) = \frac{h}{3} . \{ y_0 + 4y_1 + 2y_2 + 4y_3 + \ldots + 2y_{n-4} + 4y_{n-3} + 2y_{n-2} + 4y_{n-1} + y_n \}$$

als Simpsonsche Regel angegeben.

Es empfiehlt sich jedoch, S und T ge- sondert zu berechnen, da die Differenz (T—S) einen ungefähren Ueberblick über die Genauigkeit gewährt.

Genauere Ueberlegungen zeigen, daß der Fehler der Simpsonschen Regel auf $\frac{h^4}{180} . (y_0''' - y_n''')$ abgeschätzt werden kann, wo y_0''' und y_n''' die dritten Ableitungen von $y = f(x)$ am Anfang und Ende des Inter- valls AB sind. — Um eine Kontrolle der Genauigkeit zu gewinnen, verfährt man daher so, daß man das zu messende Intervall zuerst in n Teile von der Breite h teilt und die Rechnung durchführt.

Das Ergebnis sei J_2.

Darauf nimmt man die doppelte Anzahl 2n von Teilintervallen mit der Breite $\frac{h}{2}$. Ist der Fehler beim ersten Male ε, so ver- kleinert er sich auf den 16. Teil $\frac{\varepsilon}{16}$. Gibt die zweite Rechnung als Inhalt J_2^*, so ist ungefähr der 16. Teil der Differenz $(J_2 - J_2^*)$ der Fehler von J_2^*.

Die Rechnung, die bei der Flächenmessung

Digitized by Google

auszuführen ist, besteht in der Addition der Werte y. Diese läßt sich bequem durchführen, sofern die Kurve $y=f(x)$ gezeichnet vorliegt, wenn man sich eines Meßrädchens, „Kurvimeter" genannt, bedient. Dies besteht aus einem kleinen Rade mit geeignetem Handgriff und einem Zählwerk, das die Umdrehungen des Rades registriert. Mit diesem Rade werden die Ordinaten in der richtigen Reihenfolge der Reihe nach durchlaufen, worauf ihre Summe am Zählwerk abgelesen werden kann.

Ist ein solches Instrument nicht zur Hand, so empfiehlt es sich, die einzelnen Ordinaten mittels Bleistiftstrichen auf einem genügend langen Papierstreifen hintereinander zu markieren und erst die gesamte Länge zu messen.

Die Simpsonsche Regel bleibt auch anwendbar bei der Messung von Flächen, die allseitig von krummlinigen Kurven begrenzt werden. Man zieht eine Schar äquidistanter paralleler Geraden über die Fläche und summiert deren Längen in analoger Weise wie vorher. Mitunter ist es vorteilhaft, das Flächenstück mit transparentem Millimeterpapier zu überdecken, um dadurch ohne weitere Zeichenarbeit die parallelen Geraden zu erhalten.

Die Wahl des Abstandes h der Parallelgeraden richtet sich nach den Krümmungsverhältnissen der Randkurve. Ist deren Verlauf ein glatter, so genügt eine größere Intervallbreite h. Man muß abschätzen, ob die Approximation der Randkurve durch die Parabelsegmente der Breite 2h eine genügend genaue ist. Es kann auch zweckmäßig sein, einzelne Teile der zu messenden Fläche mit verschiedenen Intervallbreiten zu behandeln.

1c) Auszählen. Zeigt die Randkurve einen sehr unruhigen Verlauf, so kommt man bisweilen genauer und schneller zum Ziel, durch „Auszählen" des Flächeninhaltes. Liegt die Kurve bereits auf Millimeterpapier gezeichnet vor, so teilt man die Fläche zunächst in möglichst große Rechtecke ein und zählt schließlich die von dieser Einteilung übrig gelassenen Quadratmillimeter einzeln zusammen, wobei man die unmittelbar an der Randkurve liegenden Quadrate nach Augenmaß als voll rechnet oder wegläßt.

Ist die Kurve auf gewöhnlichem Papier gezeichnet, so kann man auszählen, indem man sie mit transparentem Millimeterpapier bedeckt.

2. Planimeter. 2a) Allgemeines kinematisches Prinzip. Die Theorie der Planimeter gründet sich am zweckmäßigsten auf das Prinzip des von einem in der Ebene frei beweglichen Vektor überstrichenen Flächenraumes (s. Fig. 3).

Es sei $\overrightarrow{AB}$ ein Vektor von der Länge p. Dieser werde von einer Anfangslage AB aus in eine unendlich benachbarte Lage A_1B_1 überführt. Diese infinitesimale Verschiebung läßt sich so auffassen, daß der Punkt A des Vektors um ein Stück $d\sigma$ nach A_1 geschoben

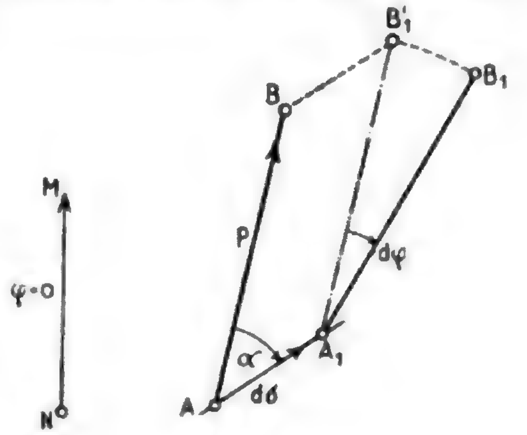


Fig. 3.

und dazu die Richtung des Vektors um einen Winkel $d\varphi$ geändert wird. Als Richtung möge der Winkel φ gelten zwischen der positiven Richtung des Vektors und einem festen Vektor NM, und zwar sei φ positiv, wenn die Richtung von AB aus der Richtung von NM durch eine Drehung um φ im Sinne des Uhrzeigers hervorgeht.

Bei der Verschiebung des Vektors von AB nach A_1B_1 wird von jedem Längenelement dp desselben ein Flächenelement „überstrichen". Dieses werde positiv gerechnet, wenn dp das Flächenstückchen für einen in der Richtung des Vektors blickenden Beschauer von links nach rechts überstreicht. Der Vektor AB überstreicht bei der Verschiebung auch ein Flächenstück, das natürlich die Summe der von den einzelnen Vektorelementen dp überstrichenen Flächenelementen ist. Zerlegt man die Verschiebung von AB nach A_1B_1 in zwei Schritte, indem man zunächst den Vektor parallel mit sich um die Strecke $d\sigma$, die den Winkel α mit der Richtung des Vektors bilden möge, verschiebt, so daß er in die Lage $A_1B'_1$ kommt, und dann den Vektor um A_1 durch den Winkel $d\varphi$ dreht, so wird der vom Vektor überstrichene Flächeninhalt dF:

$$dF = p.d\sigma.\sin\alpha + \frac{1}{2}.p^2.d\varphi$$

(hierbei gilt für die Vorzeichen von α und $d\sigma$ dieselbe Regel wie für φ und den Vektor AB). Der erste Term in dem Ausdruck dF rührt von der Parallelverschiebung, der zweite von der Drehung her.

Beschreiben die Endpunkte A und B nun je eine Kurve, wobei der Vektor von

Digitized by Google

einer Anfangslage A_0B_0 in eine Endlage A_eB_e übergeführt wird, so ergibt sich als dabei überstrichener Flächenraum F:

$$F = \int_{\sigma_0}^{\sigma_e} p.\sin\alpha.d\sigma + \frac{1}{2}p^2.(\varphi_e - \varphi_0).$$

Hierbei ist α als Funktion von σ aufzufassen, wodurch die Bewegung des Vektors ja definiert ist. σ_0, σ_e, φ_0 und φ_e sind die Werte von σ und φ am Anfang und Ende der Bewegung.

Im besonderen können nun A und B geschlossene Kurven beschreiben, so daß Anfangs- und Endlage des Vektors zusammenfallen. Dann ist in obigem Ausdruck für F der zweite Term null, da ja $\varphi_e = \varphi_0$ wird. Bezeichnet man ferner mit F_1 und F_2 die absoluten Beträge der von den Vektorendpunkten A und B umfahrenen Flächenstücke I und II, so überzeugt man sich, daß der gesamte überstrichene Raum $F = F_1 - F_2$ ist, wenn beide Flächenstücke von den betreffenden Punkten im Uhrzeigersinne umlaufen sind und sich nicht umschließen.

Es gilt also in diesem Falle:

$$F = F_1 - F_2 = \int p.\sin\alpha.d\sigma$$

Führt man nun den Punkt A des Vektors auf ein und demselben Kurvenstück hin und her, während der andere Punkt P die Fläche I umfährt, so behalten die Gleichungen ihre Gültigkeit und es wird in diesem Falle $F_2 = 0$, so daß F_1 durch das Integral $\int p.\sin\alpha.d\sigma$ dargestellt wird, das an dem vom Punkte A beschriebenen Kurvenstück entlang hin und her zu erstrecken ist.

2b) Polarplanimeter. Bei der praktischen Ausführung der Planimeter für diesen Fall wird der Vektor AB durch eine starre Stange realisiert. Der eine Endpunkt A wird bei einigen Ausführungen durch eine Geradführung auf einer Geraden geführt. Bei anderen Konstruktionen (dem sogenannten Polarplanimeter) bewegt er sich auf einen Kreisbogen, indem eine zweite Stange PA in A gelenkig mit der ersten verbunden ist, während sie sich um ihren anderen festen Endpunkt (den Pol) drehen kann (Fig. 4). Die Auswertung des Integrals $\int p.\sin\alpha.d\sigma$ wird kinematisch in verschiedenen Ausführungen realisiert. Bei dem am meisten gebräuchlichen Polarplanimeter in folgender Weise:

An der Stange AB ist eine Rolle R mit glattem Rande so befestigt, daß ihre Achse der Stange parallel gerichtet ist (s. Fig. 4); dabei liegt die Rolle auf der Papierfläche auf. Wird nun die Stange AB parallel mit sich, wie früher, um ein Stück $d\sigma$, das mit AB den Winkel α bildet, verschoben, so dreht sie sich um einen Winkel

$$d\omega_1 = \frac{a\sigma.\sin\alpha}{\varrho}$$

(wenn ϱ der Rollenradius ist).

Bezeichnet man mit d den Abstand des Rollenmittelpunktes m vom Punkte A und

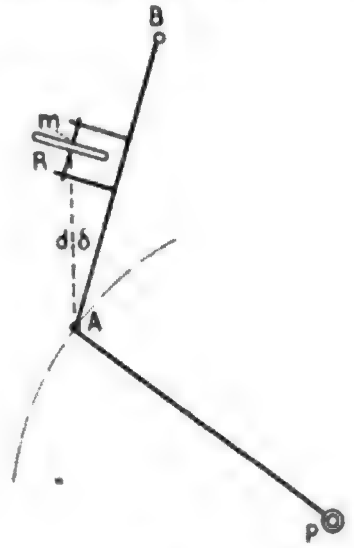


Fig. 4.

mit δ den Winkel ∢mAB (wodurch die Stellung der Rolle am Stabe AB festgelegt ist), so wird die Drehung $d\omega_2$ der Rolle bei einer Drehung der Stange AB um A durch den Winkel $d\varphi$:

$$d\omega_2 = \frac{d}{\varrho}.\cos\delta.d\varphi.$$

Die gesamte Drehung der Rolle bei einer Elementarverschiebung der Stange, wie sie früher vorgenommen wurde, ist also:

$$d\omega = d\omega_1 + d\omega_2 = \frac{1}{\varrho}.\{\sin\alpha.d\sigma + d.\cos\delta.d\varphi\}.$$

Umfährt der Endpunkt B der Stange, der zu einem Fahrstift ausgebildet ist, die Fläche I, während A auf einem Kreisbogen bezw. einer Geraden hin und her gleitet (es gibt für beide Fälle Konstruktionen), so wird die gesamte Rollendrehung ω:

$$\omega = \frac{1}{\varrho}.\int \sin\alpha.d\sigma.$$

Sie gibt also bis auf eine Konstante $(p.\varrho)$ die umfahrene Fläche I an.

$$F_1 = p.\varrho.\omega.$$

Die Rollendrehung ω kann an einem Zählwerk abgesehen werden.

Die sogenannten Kompensationsplanimeter sind so eingerichtet, daß durch zwei aufeinanderfolgende Messungen der

Digitized by Google

Fehler beseitigt werden kann, der durch Ungenauigkeit in der Parallelstellung der Rollenachse zur Stange AB entsteht.

Die Polarplanimeter können auch zur Messung so großer Flächenstücke benutzt werden, daß deren Umfahrung mit dem Punkte B der Stange nur so möglich wird, daß die Kontur der Fläche den Pol P umschließt.

Dann beschreibt der Punkt A einen vollen Kreis und es wird $(\varphi_e-\varphi_0)=2\pi$. Die Stange AB überstreicht jedoch nur den ringförmigen Teil der zu messenden Fläche zwischen deren Kontur und dem von A beschriebenen Kreise, dessen Radius r sei. Die Rollendrehung wird jetzt:

$$\omega=\frac{1}{\varrho}\cdot\left\{\int\sin\alpha\, d\sigma+d.\cos\delta.2\pi\right\};$$

die von der Stange überstrichene Fläche wird: $F'=\int p.\sin\alpha.d\sigma+p^2.\pi$.

Die gesamte Fläche ist aber $F=F'+r^2\pi$. Sie hängt also mit der Rollendrehung ω zusammen:

$$F=p.\varrho.\omega+\pi.\{p^2+r^2-2p.d.\cos\delta\}.$$

Es ließen sich demnach ohne Schwierigkeiten Planimeter bauen, bei denen

$$p^2+r^2-2pd.\cos\delta=0$$

ist, die also stets den Flächeninhalt an der Rollendrehung ablesen lassen.

Eine erhebliche Fehlerquelle kann bei den Polarplanimetern in ungleichmäßiger Beschaffenheit der Papieroberfläche entstehen, da die Drehung der Rolle hierdurch ungünstig beeinflußt wird.

Es sind deshalb Konstruktionen ausgeführt, die diesen Uebelstand vermeiden. Die Auswertung des Integrals $\int p.\sin\alpha.d\sigma$ erfolgt hierbei durch Mechanismen, bei denen nur Metallteile aufeinander rollen und gleiten. Von der großen Anzahl von hierhergehörigen Konstruktionen sei das „Scheibenplanimeter" und das „Kugelrollplanimeter" (beide von Coradi-Zürich) genannt. Instrumente von sehr großer Genauigkeit.

2c) Schneidenplanimeter Prytz. Einen ganz anderen Gedanken verfolgt die Konstruktion des „Schneidenplanimeters", die von dem Dänen Prytz herrührt.

Auch hierbei ist der Vektor AB durch eine Stange realisiert, die am Ende B einen Führstift trägt. Das Ende A ist als Schneide ausgebildet, in deren Ebene die Stange liegt und die leicht in das Papier hineingedrückt wird (s. Fig. 5). Das Instrument hat also keinen beweglichen Teil und ist mit den einfachsten Mitteln herzustellen. Ein Taschenmesser mit halb aufgeklappter kleiner Klinge als Führstift und ganz aufgeklappter großer Klinge als Schneide kann schon befriedigende Resultate liefern. Wird der Stift B auf einer Kurve entlang geführt, so führt die Schneide den Punkt A auf einer Bahnkurve, deren Tangente im Punkte A stets durch den Punkt B geht. Der früher eingeführte Winkel α zwischen Bahnkurve σ von A und der Stangenrichtung AB ist also dauernd Null. Mithin ist das Integral $\int p.\sin\alpha.d\sigma=0$ und bei einer Bewegung der Stange ist die von ihr überstrichene Fläche:

Fig. 5.

$$F=\frac{p^2}{2}.(\varphi_e-\varphi_0).$$

Umfährt der Stift B eine Fläche I, so durchfährt die Schneide A eine sich nicht schließende Kurve mit Spitzen. Eine nicht einfache Ueberlegung zeigt, daß die von der Stange bei der Umfahrung von I überstrichene Fläche nahezu gleich $F_1-\frac{p^2}{2}.(\varphi_e-\varphi_0)$ ist, so daß $p^2(\varphi_e-\varphi_0)$ den Inhalt von F_1 gibt. Die Ueberlegung zeigt ferner, daß man statt die Kontur von F_1 einfach zu durchlaufen, am Anfange den Stift B in den Schwerpunkt der Fläche I zu setzen hat (es genügt denselben nach Augenmaß zu ermitteln).

Darauf hat man den Stift B auf einer Geraden vom Schwerpunkt an die Kontur zu führen, diese zu durchlaufen und auf derselben Geraden zum Schwerpunkt zurückzuführen, worauf der Winkel $(\varphi_e-\varphi_0)$ zwischen Anfangs- und Endlage der Stange zu messen ist.

Denkt man sich um den Schwerpunkt der Fläche einen Kreis mit solch einem Radius r geschlagen, daß sein Trägheitsmoment gleich dem der zu messenden Fläche ist, so erhält man in dem Ausdruck $\frac{r^4.\pi}{4.p^2}$ eine Korrektur, so daß der Inhalt F_1 genauer mit

$$F_1=p^2.(\varphi_e-\varphi_0)+\frac{r^4.\pi}{4.p^2}$$

angegeben wird.

Den Einfluß des Korrektionsgliedes kann man jedenfalls leicht abschätzen.

Statt den Winkel $(\varphi_e-\varphi_0)$ zu messen, genügt es, den Abstand s zwischen der Anfangs- und der Endlage der Schneide zu bestimmen, da mit genügender Annäherung $(\varphi_e-\varphi_0).p=s$ gesetzt werden darf.

Immerhin bleibt die nachträgliche Messung des Winkels eine unangenehme Fehlerquelle.

Digitized by Google

Diese wird bei einer Abänderung des lanimeters vermieden, bei der die Schneide ı Punkte A ersetzt wird durch zwei Rollen it scharfem Rande (s. Fig. 6), deren geeinsame Achse durch A geht und senkrecht ıf AB ist. Die relative Verdrehung der ollen gegeneinander, die an einem Nonius

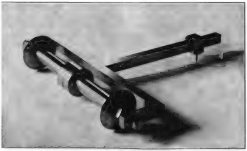


Fig. 6.

ɔgelesen werden kann, gibt dann den gechten Winkel ($\varphi_e - \varphi_a$). In dieser Form ›ertrifft das Instrument die Genauigkeit ·r Polarplanimeter erheblich.

Was die Genauigkeit der Flächenessung mit Planimetern anbelangt, so ırd diese durch die Sorgfalt und manuelle eschicklichkeit beim Umfahren der Fläche ·dingt. Die Fehler, die im Instrument selbst .tstehen, sind bei guten Planimetern (die ·ch 0,3 qmm abzulesen gestatten), verhwindend gegen die unvermeidlichen Unnauigkeiten bei der Handhabung. Es : durchaus erforderlich eine Messung mehr s einmal auszuführen, um aus der Differenz ·r Ablesungen den Fehler des Resultats ›schätzen zu können.

Besondere Beachtung erfordert die Ausessung von Kurven, die unter Benutzung ›n Millimeterpapier aufgezeichnet sind, da eses mitunter sehr starke Verzerrungen aufeist.

Will man hierzu Planimeter benutzen, empfiehlt es sich, mit demselben zunächst n auf dem Millimeterpapier abgegrenztes uadrat oder Rechteck zu umfahren und e Ablesung am Planimeter mit dem heinbaren (durch Rechnung bestimmten) halt zu vergleichen, wodurch ein für die ›rzerrung erforderlicher Reduktionsfaktor wonnen wird, da man die Verzerrung mit nügender Annäherung als affine Aenderung ·r Ebene auffassen kann.

Hat man nämlich eine Funktion y=f(x) f Millimeterpapier gezeichnet, so sind da·i die Zahlen y und x durch Abzählen der Teilstriche auf dem Millimeterpapier zur Darstellung gebracht.

Man sucht beim Auswerten des Integrals $\int_a^b f(x)dx$ ebenfalls eine Zahlenangabe, deren Beziehung zum faktischen Flächeninhalt der eingeschlossenen Fläche, den das Planimeter liefert, abhängig ist von der Größe der Längeneinheiten der x- und y-Achsen und dem Winkel, den diese bilden.

Benutzt man zur Flächenmessung die Simpsonsche Regel und liest die Ordinatenwerte y auf der Zeichnung ab, so ist eine Korrektur unnötig.

Auch bei Ausmessung von Kurven, die durch selbstregistrierende Apparate mit krummliniger Bewegung des Schreibstiftes geliefert werden, bleibt die Simpsonsche Regel gültig.

3. Ausmessung krummer Oberflächen. Zur Ausmessung von Flächenstücken einer krummen Oberfläche läßt sich eine Abänderung des auf S. 1175 eingeführten Meßrädchens benutzen. Auf einer Achse mit dazu senkrechtem Handgriff werden zwei gleich große Rädchen mit scharfem Rande angebracht. Ihr Abstand voneinander, der zweckmäßig verstellbar gemacht wird, sei Δn.

Ist ω die Kontur des zu messenden Flächenstückes, so beginnt man die Messung, indem man das Instrument auf einer geeigneten Kurve durch das Flächenstück, von einem Punkte des Randes bis zum anderen Punkte, hindurchführt. Der Inhalt des Flächenstreifens zwischen den von den Rollen beschriebenen Parallelkurven ist $\Delta n . l$, wenn l die im Instrument registrierte Länge ist.

Jetzt führt man das Instrument so, daß die eine Rolle eine Kurve durchfährt, die beim erstenmal bereits von der anderen Rolle durchlaufen ist (für Sichtbarmachen dieser Kurven ist durch Berußen oder dgl. Sorge zu tragen!). Dadurch erhält man einen zweiten Parallelstreifen der Fläche usf. Hat man das zu messende Flächenstück in dieser Weise mit Parallelkurven bedeckt (eventuell ist ω in Teilbereiche zu zerlegen), so liest man am Instrument Σl ab, und $\Delta n . \Sigma l$ ist eine Aproximation für den gesuchten Flächeninhalt.

Der Fehler, den man hierbei dadurch begeht, daß man statt des Bogenelementes der Normalkurve zwischen zwei Parallel-

Digitized by Google

kurven, die Sehne Δn mißt, ist der dritten Potenz von Δn proportional und hängt von der Krümmung der Fläche relativ zu dem eingestellten Δn ab.

Auch hier wird mehrfache Ausmessung des Flächenstückes eine Schätzung des Fehlers ermöglichen.

Literatur. *Serret-Scheffers. Bd. II. Lehrbuch der Differential- und Integralrechnung.* — **Coradi-(Zürich),** *Die Planimeter Coradi.* — **C. Runge,** *Das Schneidenplanimeter. Zeitschr. für Vermessungswesen. XXIV, 12.* — **L. Jacob,** *Le calcul mécanique.* — **A. Galle,** *Die mathematischen Instrumente.*

H. von Sanden.

Flagellata.

A. Allgemeiner Teil. 1. Gestalt und statische Organellen. 2. Stoffwechselorganellen. 3. Kernbau und Kernteilung. 4. Bewegungsorganellen. 5. Fortpflanzung, Befruchtung und Entwickelung. B. Systematischer Teil. I. Euflagellaten. II. Dinoflagellaten. III. Cystoflagellaten.

A. Allgemeiner Teil.

Die Flagellaten im weiteren Sinne oder Mastigophoren stellen sowohl in bezug auf ihre äußere Gestalt als auch ihre innere Organisation und Lebensweise eine sehr mannigfaltige Gruppe von Protisten dar. Allen Formen gemeinsam ist der Besitz von Flagellen oder Geißeln. Doch gibt es fast in allen Gruppen Formen (meist solche mit parasitischer oder rein pflanzlicher Ernährung), bei denen die Geißeln für eine kürzere oder längere Lebensepoche rückgebildet sind, ja sogar ganz fehlen. Die Grenze zwischen Tier- und Pflanzenreich verwischt sich hier bei den Flagellaten vollkommen. Neben Formen mit rein tierischer Lebensweise durch Aufnahme geformter Nahrung finden sich oft in derselben Untergruppe solche mit rein pflanzlicher Ernährung (holophytisch) mit Hilfe von Chromatophoren. Auch Uebergänge sowie beiderlei Lebensweise kommt bei nahe verwandten Arten vor (z. B. Crysamoeba). Von den sich rein pflanzlich ernährenden Algen lassen sich die Grünalgen in lückenloser Reihe von Flagellaten ableiten (vgl. den Artikel „Algen"). Auch zu fast allen Protozoenstämmen zeigen die Flagellaten Verwandtschaftsbeziehungen, so zu Rhizopoden, Ciliaten und Sporozoen, ja eine Gruppe der letzteren, die sogenannten Hämosporidien, werden jetzt wohl richtiger mit Hartmann direkt den Flagellaten eingereiht.

1. Gestalt und statische Organellen. Die äußere Gestalt kann sehr verschieden sein. Bei den niedersten Formen, wie Rhizomastiginen und den primitiven Crysomonaden findet sich infolge des Fehlens einer Pellicula und innerer Skelettelemente wechselnde Gestalt; diese Formen vermögen daher auch Pseudopodien zu bilden, zum Teil können sie nach Abwerfen ihrer Geißel sogar längere Zeit direkt als Amöben erscheinen. Eine feste Gestalt wird bei höherer Differenzierung erreicht durch Ausbildung innerer Fibrillen oder durch Verfestigung der Oberfläche (Pelliculabildung) oder Ausscheidung von Gehäusen. Die Ausbildung innerer Fibrillen, sogenannter Achsenstäbe, wie wir sie z. B. bei Cercomonas (Fig. 1)

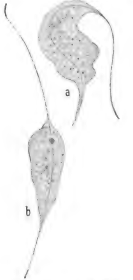
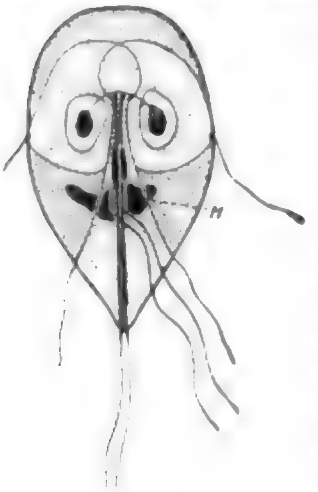


Fig. 1. Cercomonas parva Hartm. u. Chagas. Individuum in 2 Bewegungsstadien. Achsenstab. Nach Hartmann und Chagas.

und Trichomonas finden, verleiht der Zelle zwar eine bestimmte Gestalt, ermöglicht aber immer noch bis zu einem gewissen Grade eine amöboide Veränderlichkeit (Fig. 1), zum mindesten eine starke Metabolie, auch kann bei gewissen Stadien eine Rückbildung der Skelettelemente und damit ein Verlust der Morphe eintreten. Allein schon durch die Ausbildung so komplizierter Fibrillensysteme, wie bei der Gattung Lamblia (Fig. 2), kann die Gestalt unveränderlich werden. Weit verbreitet ist die Ausbildung einer festen

Digitized by Google

ellicula (auch Periplast genannt). Diese ınn entweder vollkommen starr sein und mit jede Bewegung unmöglich machen ler sie ist noch nachgiebig und kontraktions-hig, in welchem Falle oft eine weitgehende etabolie des Körpers stattfinden kann. In tzterem Falle sind häufig elastische Fi-illen in Form von Spiralenfäden in der Oberfläche eingelagert, wodurch eine Metabolie in Form von Kontraktionswellen über die Länge des Körpers möglich ist. Bei vielen Formen wird durch die Pellicula hindurch noch eine Gallerthülle ausgeschieden, die verschieden stark und auch in der Form verschieden ausgebildet sein kann. Sehr häufig tritt Gallertbildung auch in Form von Stielen und Röhren zutage und die Art der Gallertausscheidung ist meist für die einzelnen Arten charakteristisch. In der Gallerte können noch wie z. B. bei Spongomonas Kugeln von unbekannter Natur eingelagert sein (Fig. 3), bei andern Formen ist sie durch Eiseneinlagerung braun gefärbt. Die bei vielen Flagellaten so häufige Koloniebildung wird in den meisten Fällen durch die Gallertausscheidung ermöglicht (Fig. 3). Weiterhin können aber auch außerhalb der Pellicula noch mehr oder minder feste Hüllen und Gehäuse ausgeschieden werden. Bei manchen Formen sind dieselben nur hautartig, bei anderen bilden sich dicke Panzer, die allseitig den Körper umschließen und nur kleine Oeffnungen zur Kommunikation mit der Außenwelt lassen (Fig. 4). Vielfach bestehen diese Hüllen aus Chitin oder doch chitinähnlichen Substanzen,



g. 2. Lamblia intes-nalis mit komplizier-m, formbestimmenden Fibrillensystem. Nach Bensen.

·. 3. Kleine Kolonie ı Spongomonas lendidum Stein. llertgehäuse. Nach rtmann und Chagas.

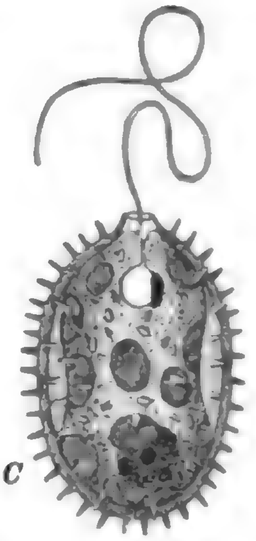


Fig. 4. Trachelomonas hispida Stein mit fester Hülle. Nach Senn.

in anderen aus Zellulose. Sie können besonders bei Peridineen sehr komplizierte äußere Skulpturen aufsetzen, Leisten, Fortsätze usw. Bei den Peridineen besteht das Zelluloseskelett zudem aus einer Anzahl von Platten, deren Zusammensetzung und Zahl systematisch von Bedeutung ist. Die zu den Crysomonaden gehörigen Coccolithophoriden (eine wohl nur biologische Gruppe) besitzen äußere Skelette, die aus kalkigen Blättchen, Nadeln und Stacheln zusammengesetzt sind (Fig. 5), während die nahver-

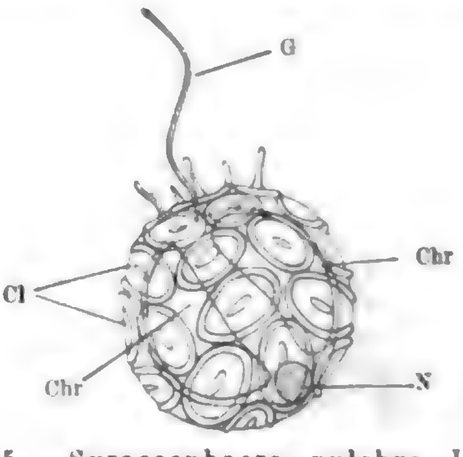


Fig. 5. Syracosphaera pulchra Lohm. Schale aus Kalkplättchen, Coccolithen (Cl) zusammengesetzt. Chr Chromatophoren, G Geißel, N Kern. Nach Lohmann. Aus Doflein.

wandten Silicoflagellaten durchbrochene Gehäuse aus Kieselsäure besitzen, die mit den Gehäusen der Radiolarien eine Aehnlichkeit aufweisen (Fig. 6).

2. Stoffwechselorganellen. Die Nah-

Digitized by Google

rungsaufnahme geschieht bei Formen mit tierischer Ernährungsweise, solange sie nackt sind, an jeder beliebigen Stelle der Körperoberfläche. Ist eine Pellicula vorhanden, dann ist in der Regel eine besondere Mundstelle, meist am Grunde der Geißeln ausgebildet. Bei höheren Formen hat sich dieselbe vielfach zu einem deutlichen Cytostom organisiert, am ausgebildetsten bei Cryptomonaden und Euglenoideen. Bei ersteren ist der Schlund mit Körnchen oder Stäbchen ausgekleidet — bei Cyathomonas (Fig. 7) bilden sie nur einen sogenannten Schlundring —, die sich mit chromatischen Farbstoffen färben und neuerdings von Scherffel als Trichocysten gedeutet werden, da sie zu Gallertfäden ausgestoßen werden können. Bei den Peranemiden findet sich am Grunde des Schlundes zu einer Vakuole hinziehend ein sogenanntes Staborgan, das vermutlich eine im Dienste der Nahrungsaufnahme stehende Röhre ist. Sehr deutlich ist diese röhrenartige Ausbildung bei der Gattung Entosyphon (Fig. 8), bei der sie bei der Nahrungsaufnahme aus dem Körper vorgestülpt wird.

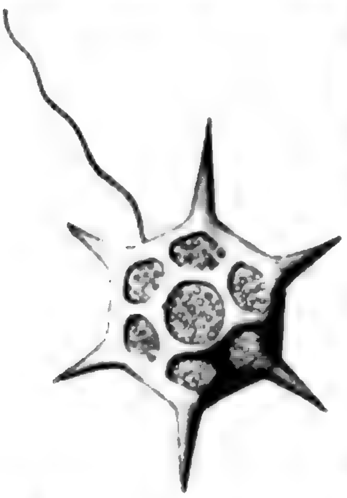


Fig. 6. Distephanus speculum Ehr. mit kieseliger Gitterschale. Nach Borgert. Aus Doflein.

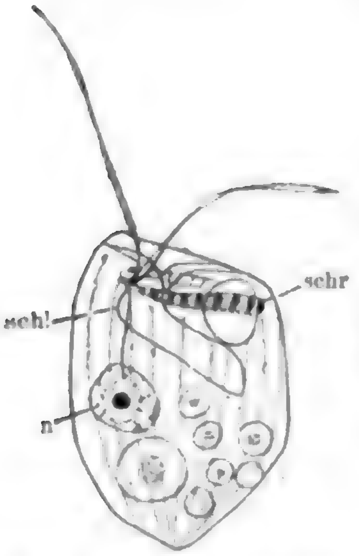


Fig. 7. Cyathomonas truncata From. n Kern, schl Schlund, sehr Schlundring. Kombinierte Figur. Nach Uleha.

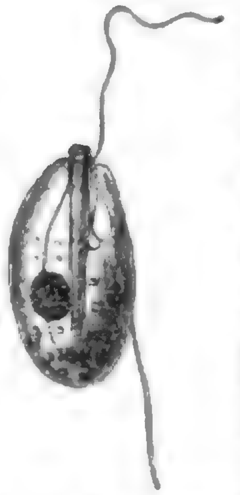


Fig. 8. Entosiphon sulcatum Stein mit Schlundröhre. Nach Senn.

Die pflanzlichen Flagellaten besitzen Chromatophoren, deren Zahl und Gestalt für die betreffenden Arten oder Gruppen in der Regel sehr charakteristisch ist. Pyrenoide, kernartige Gebilde, die meist für besondere Stärkebildner gehalten werden, finden sich nur bei einem Teil der chromatophorenführenden Flagellaten. Die Farbe der Chromatophoren ist sehr verschieden, bei den Phytomonadinen ist sie rein grün und durch Chlorophyll bedingt, bei den Chrysomonaden, Cryptomonaden und Peridineen finden sich gelbe, braune und blaugrüne Färbungen. Die Farbe der Chromatophoren kann sich bei ein und derselben Art unter verschiedenen physiologischen Lebensbedingungen ändern. Bei manchen Formen werden die Chromatophoren bei Dunkelkulturen vollkommen farblos und diese Formen können sich dann rein saprozoisch ernähren. Die Assimilationsorganellen sind dann aber in Form von Leukoblasten noch vorhanden. Ebenso liegen die Verhältnisse bei farblosen Vertretern der Cryptomonaden, wie z. B. Chilomonas, die trotzdem pflanzlicherweise Stärke produzieren. Als Stoffwechselprodukte treten innerhalb des Protoplasmas auf Stärke, Paramylon, Glykogen, Leukosin, Volutin und fettes Oel.

Bei den Flagellaten kommen allgemein (mit Ausnahme der parasitischen Formen) kontraktile Vakuolen vor. Bei Protomonadinen, Rhizomastiginen und niederen Chromomonadinen sind es ein bis mehrere einfache pulsierende Vakuolen, allerdings meist an bestimmten Körperstellen lokalisiert; bei den höheren Chromomonadinen, den Euglenoideen und Dinoflagellaten, findet sich ein sogenanntes Vakuolensystem, das sind mehrere pulsierende Vakuolen, die ihren Inhalt in eine nicht pulsierende, als Reservoir dienende, konstante Sammelvakuole entleeren, die durch einen Ausgangsporus mit dem Schlund (Euglenen) resp. der Geißelspalte (Dinoflagellaten) in Verbindung steht (Fig. 9). Bei letzteren gibt es daneben noch eine zweite Sorte von meist sehr großen konstanten Vakuolen mit besonderer Hautschicht und eigenem Ausführgang

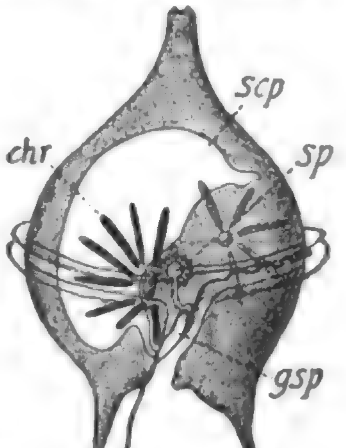


Fig. 9. Peridinium divergens Ehr. ch Chromatophoren, gsp Geißelspalte, Scp Sackpusule, Sp Sammelvakuole. Nach Schütt. Aus Oltmanns.

Digitized by Google

nach der Geißelspalte (Sackpusulen nach Schütt), deren Bedeutung unbekannt ist (Fig. 9).

Ein großer Teil der pflanzlichen Formen (aber auch einiger rein tierischen) hat meist in der Nähe der Geißelbasis des Vorderendes, manchmal aber auch seitlich oder sogar rückwärts verlagert sogenannte Augenflecke (Stigmata), eine Ansammlung von kleinen rot gefärbten Körnchen oder Tröpfchen in einer dichteren plasmatischen Grundsubstanz. Sie werden als Organelle für die Licht- und Wärmeperzeption aufgefaßt. Bei Pouchetiaarten liegt der Pigmentansammlung ein deutlich linsenartiger Körper auf.

3. Kerne und Kernteilung. Entsprechend der allgemeinen Mannigfaltigkeit der Organisation der Flagellaten ist auch der Kernbau ein recht verschiedener, doch lassen sich gewisse Typen aufstellen und voneinander ableiten, die auch für die Systematik der Klasse von Bedeutung sind. Da die Organisation der Kerne nur auf Grund ihrer Teilung verstanden werden kann, ist letztere im folgenden gleich mit besprochen.

Der erste Typ umfaßt die Caryosomkerne, das sind bläschenförmige Kerne mit einem chromatischen Binnenkörper, dem Caryosom. Im einfachsten Falle enthält dieses das lokomotorische (Zentren) als auch das generative Material für die Kernteilung. Die ganze Spindelfigur geht mithin aus dem Caryosom hervor, ohne Beteiligung des Außenkerns. Im allgemeinen ist aber ein deutlicher durch eine Kernmembran gegen das Protoplasma abgegrenzter Außenkern vorhanden, der Chromatinkörner enthält. Dieser Außenkern kann entweder rein trophische Bedeutung besitzen, also bei der Kernteilung keine Rolle spielen, oder aber auch teilweise, ja ganz, das Material der generativen Komponente liefern. Die lokomotorische Komponente des Caryosoms kann verschieden ausgebildet sein, sie kann stark chromatisch sein und bei der Kernteilung dicke Polkappen bilden oder sie ist fast chromatinfrei und bildet eine achromatische Spindel mit Zentriolen (Spongomonas, Fig. 10). Die generative Komponente kann zuweilen deutlich aus einzelnen Chromosomen bestehen, die bei Trichomonas sogar eine Zahlenkonstanz aufweisen. Dieser Typus findet sich hauptsächlich bei Protomonadinen und Binucleaten.

Der zweite Typus von Flagellatenkernen wird repräsentiert durch Caryosomkerne mit einem dauernden Außenkern, der stets das generative Material enthält, das bei höheren Formen eine Aequatorialplatte mit stark ausgeprägten Chromosomen bildet. Es ist eine scharfe Trennung eingetreten in generatives Material, das im Außenkern liegt, und lokomotorisches Material, das im Caryosom lokalisiert ist. Bei der Teilung schnürt sich das letztere meist hantelförmig durch und bildet eine oft wabig gebaute Zentralspindel. Vertreter dieses Kerntypus sind die Euglenoideen (Peranema, Fig. 11) und ein Teil der Cryptomonaden und Dinoflagellaten.

Der dritte Kerntyp enthält ebenfalls stets einen dauernden Außenkern und einen Binnenkörper. Letzterer ist aber hier nicht rein lokomotorisch, sondern enthält auch generatives Material. Bei der Teilung wird er aufgelöst, sein achromatischer Teil bildet die Spindel, während sein chromatisches Material wohl in Gemeinschaft mit dem Außenkern zur Bildung der Aequatorialplatte verwandt wird. Meist kommt es hier zur Ausbildung bestimmter Chromosomen von konstanter Zahl. Das Verhalten der lokomotorischen Komponente ist bei diesem Typ noch nicht vollkommen klargelegt. Derselbe findet sich bei den Phyto-

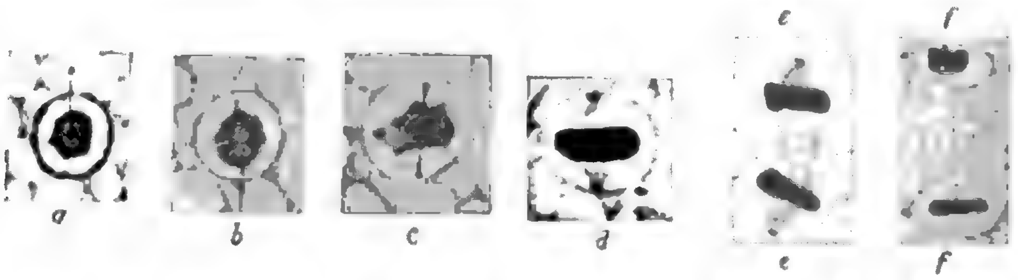


Fig. 10. Kern und Kernteilung von Spongomonas uvella Stein. Nach Hartmann und Chagas.

Fig. 11. Kernteilung von Peranema trichophorum. Nach Hartmann und Chagas.

Digitized by Google

monadinen und nach den Beobachtungen von Alexeieff, Dangeard und Nägler scheinen auch die Kerne der Cryptomonadinen (wenigstens von Chilomonas) hierherzurechnen zu sein.

Der zweite und dritte Kerntyp lassen sich mit Leichtigkeit aus dem ersten ableiten. Zentriole als Teilungsorganelle bei der Kernteilung sind bei fast allen genauer untersuchten Formen festgestellt.

Ein vierter Kerntyp ist neuerdings bei verschiedenartigen Formen nachgewiesen in der Weise, daß hier die lokomotorische Komponente nicht an den auch hier vorhandenen zentralen großen Binnenkörper

a b c

Fig. 12. Zweiter Modus der Kernteilung von Trypanosoma brucei, mit Abschnürung (b) des Zentriols vom Caryosom. Unveröffentlichte Abbildungen von Kuczynski.

geknüpft ist, sondern im Außenkern oder an der Kernmembran liegt, in letzterem Falle oft in einer leichten Zuspitzung in dem am Vorderende der Zelle liegenden Kerne. Das Material der generativen Komponente wird hierbei entweder vom Binnenkörper oder vom Außenkern geliefert. Diese Sonderung der Zentren vom Binnenkörper scheint bei sonst sehr verschiedenen Kernen und in verschiedenen Ordnungen eingetreten zu sein (Rhizomastiginen, Protomonadinen, Binucleaten, Chrysomonaden), ja er findet sich oft bei derselben Art neben dem ersten Kerntyp (Trypanosoma, Fig. 12).

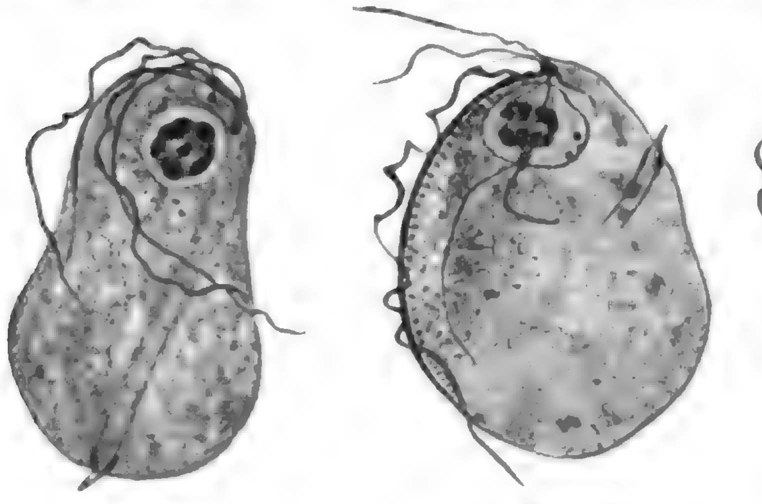
Einen fünften Typ repräsentieren endlich die Kerne der höher organisierten parasitischen Formen, Trichomonaden, Lophomonas und Calonympha, bei denen die lokomotorische Komponente extranukleär liegt und der Kern somit nur das Material für die generative Komponente liefert. Letztere tritt hierbei meist in Form bestimmter Chromosomen von konstanter Zahl auf (Trichomonas, Fig. 13). Ueber die Beziehungen des extranukleären Zentrums zur Geißel s. bei der Besprechung der Geißelverhältnisse.

Dieser vierte und fünfte Kerntypus lassen sich von dem ersten durch das Heraustreten des Zentrums aus dem Caryosom an die Kernmembran und schließlich in das Protoplasma von dem ersten ableiten (Fig. 12b).

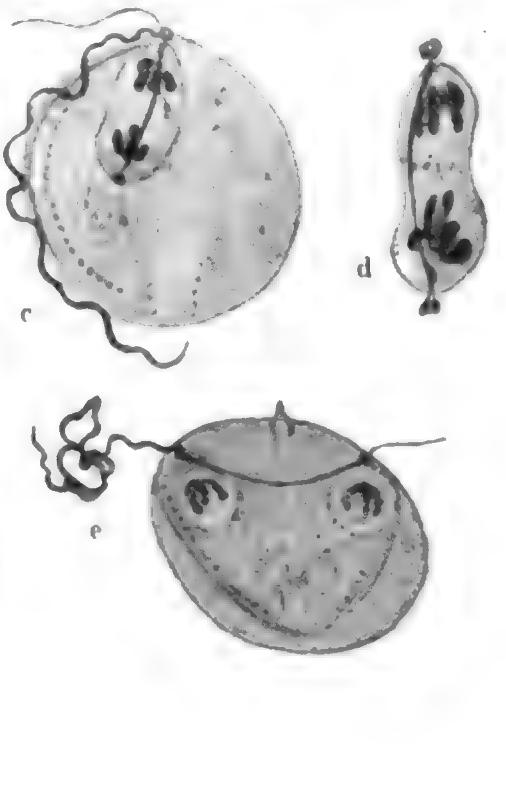
Bei den Dinoflagellaten, die bei ihren einfacheren Formen den zweiten Kerntypus aufweisen, kommt es zur Ausbildung großer massiger Kerne meist mit dauernden Chromatinfäden und echten Nukleolen und reduzierter lokomotorischer Komponente (Fig. 14).

Aehnlich ist Kern und Kernteilung bei Noctiluca, doch tritt hier außerdem eine große Sphäre mit Zentriol im Plasma hinzu. Dieselbe bildet eine Zentralspindel, während der Kern unter Erhaltung der Membran sie in eigenartiger Weise umfaßt (Fig. 15). Die Sachlage ist noch nicht ganz geklärt, vermutlich handelt es sich wie beim 4. und 5. Kerntyp um das Austreten des lokomotorischen Zentrums aus dem Kern, in diesem Falle vom Dinoflagellatentyp.

Sehr komplizierte Kerne finden wir dann noch bei den Trichonymphiden, die in ihren einfacheren Verwandten Kerne vom fünften Typ aufweisen (Näheres siehe S. 1213).



a b



c d e

Fig. 13. Teilung von Trichomonas muris. Basalkorn fungiert als Teilungszentrum. Unveröffentlichte Abbildungen von Kuczynski.

Digitized by Google

Nach **Hartmann** sind sie polyenergid, was allerdings von **Grassi** und **v. Janicki** bezweifelt wird.

Weitaus die größte Mehrzahl aller Flagellaten besitzt nur einen Kern, nur wenige Formen (**Multicilia lacustris**, die Calonymphiden) sind während des vegetativen Lebens vielkernig (polyenergid). Die Angehörigen der Familie der Distomatiden haben stets zwei gleiche Kerne, während die Binucleaten durch zwei verschiedenwertige Kerne, Haupt- und Geißelkern (s. u. S. 1198), ausgezeichnet sind.

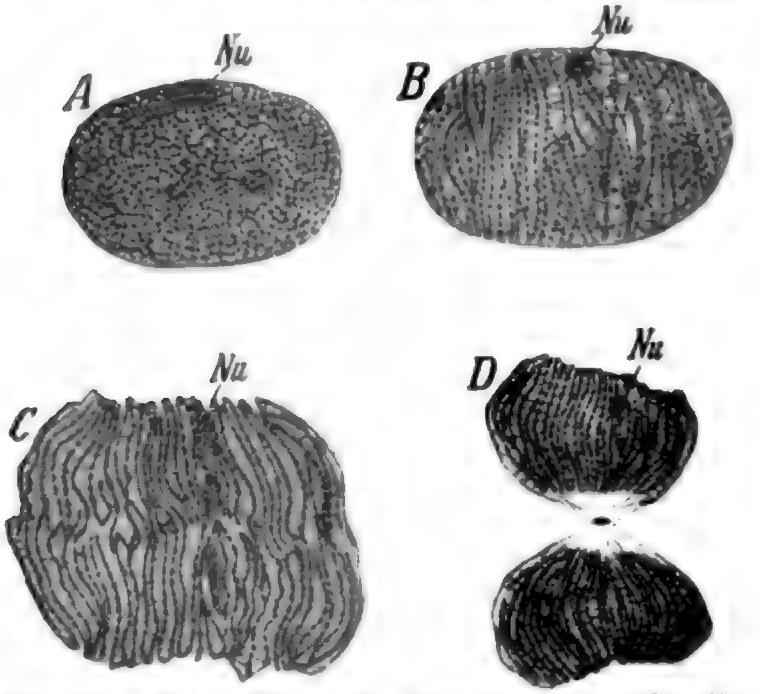


Fig. 14. Kernteilung von **Ceratium hirundinella**. Nach **Lauterborn**. Aus **Doflein**.

Fig. 15. Kernteilung von **Noctiluca miliaris**. Nach **Calkins**. Aus **Gurwitsch**.

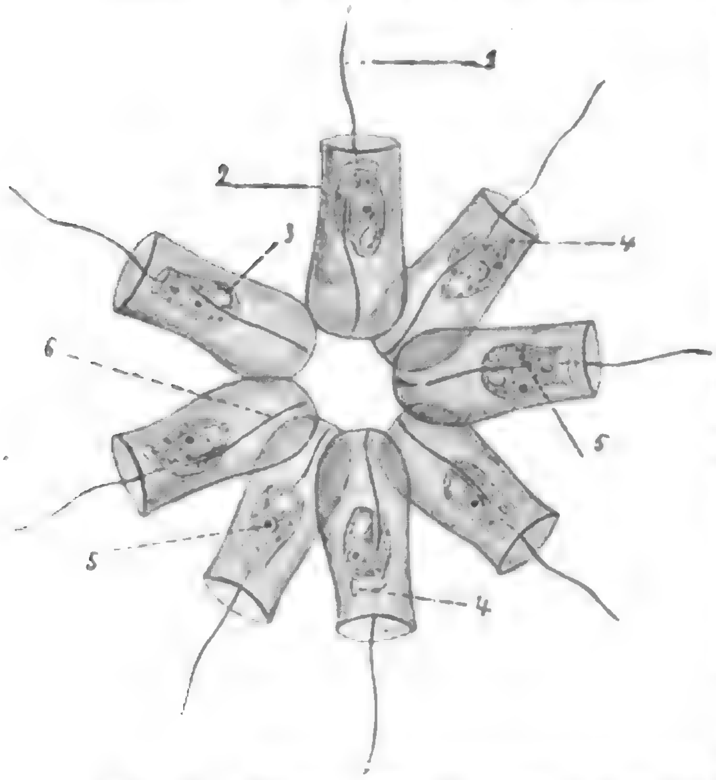


Fig. 16. Kolonie von **Bicosoeca socialis Lauterb.** Schleppgeißel (6) zum Stiel umgewandelt. 1 Geißel, 2 Gehäuse, 3 pulsierende Vakuole, 4 kragenartiger Saum, 5 Kern. Nach **Lauterborn**. Aus **Lang**.

4. Die Bewegungsorganellen der Flagellaten. Die Flagellen oder Geißeln sind sowohl nach ihrer Zahl wie nach ihrer Anordnung von großer Wichtigkeit für die Systematik der ganzen Klasse wie der einzelnen Gattungen und Familien. Sind neben einer großen Geißel noch eine oder mehrere kleinere vorhanden, so spricht man von **Haupt-** und **Nebengeißeln**. Nach rückwärts gerichtete Geißeln werden als **Schleppgeißeln** bezeichnet. Es sind das sehr lange, meist ziemlich starre Fäden, die beim Schwimmen nachgeschleppt werden und als Steuer, wohl auch zur Verankerung an andere Gegenstände dienen. Bei der Gattung **Bicosoeca** (Fig. 16) ist die Schleppgeißel direkt zu einem Stiele umgewandelt, auf dem das Flagellat festsitzt. Meistens finden sich die Geißeln am Vorderende inseriert und werden mit Ausnahme der erwähnten Schleppgeißeln bei der Bewegung nach vorn gerichtet. Bei einzelnen Gattungen wie **Nephroselmis** und **Protochrysis** (Fig. 17) sind sie auf die Seite gerückt, ebenso bei fast der ganzen Gruppe der Dinoflagellaten.

Von größter systematischer Bedeutung ist die **Insertion** der Geißeln im Körper. Nach **Schaudinn, Prowazek** und **Hartmann** stammen die Geißeln genetisch vom Kern bezw. Zentriol ab, und es lassen sich nach letzterem auf Grund der Genese und Insertion 4 Typen aufstellen.

Digitized by Google

Der erste einfachste Typus ist der, daß die Geißel direkt vom Zentriol ausgeht. In diesem Fall kann die Genese einfach als eine heteropole Teilung des Zentriols (gleichgültig ob es im Binnenkörper oder Außenkern lokalisiert ist) aufgefaßt werden, wobei die Zentrodesmose des auseinanderrückenden Tochterzentriols direkt zur Geißel wird (Fig. 18, 1). Dieser Typus kommt hauptsächlich bei den Rhizomastiginen vor, ist aber auch gelegentlich bei Spongomonas beobachtet worden, wo die Geißeln direkt von den Zentriolen während der Mitose auswachsen (Fig. 34b).

Fig. 17. Protochrysis phaeophycearum. Nach Pascher.

Bei dem zweiten Typus der Geißelinsertion entsteht durch die heteropole Teilung des Caryosoms zunächst ein Basalkorn, das häufig durch eine Zentrodesmose (in diesem Falle Rhizoplast genannt) noch mit dem Kern verbunden ist. Durch eine nochmalige Teilung des Basalkornes entsteht dann die Geißel (Fig. 18, 2). Der Rhizoplast kann später oder früher ganz oder teilweise wieder eingeschmolzen werden. Bei der Teilung geht bei den einfachsten Formen die Geißel mitsamt dem Basalkorn verloren, um dann von den beiden Tochterkernen aus wieder neugebildet zu werden. Bei den höheren Formen kann das Basalkorn vom Kerne unabhängig werden (durch Einschmelzung des Rhizoplasts) und sich selbständig teilen (Cyathomonas usw.). Ja es kann sogar bei der Kernteilung die führende Rolle spielen und als Zentriol der Kernspindel funktionieren, wie das beim vierten Kerntyp (s. Fig. 13) schon erläutert wurde. Die alten Geißeln werden hierbei von dem einen Tochtertier übernommen (eventuell auf beide unregelmäßig verteilt) und in dem anderen vom Basalkorn wieder neugebildet. Dieser zweite Typus der Geißelinsertion ist der am weitesten verbreitete. Er findet sich bei sämtlichen Protomonadinen, Polymastiginen, Chromomonadinen und Phytomonadinen.

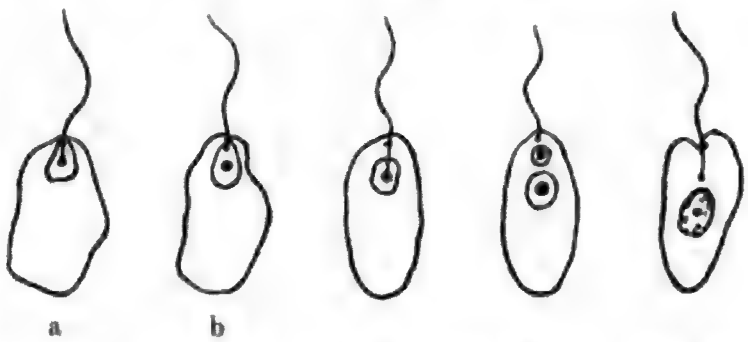


Fig. 18. Schema der Geißelinsertion bei den Flagellaten.

Von besonderem Interesse ist der dritte Typus des Geißelbaues der Flagellaten, der sich nur bei den Binucleaten (Trypanosomen und Verwandten) findet. Hier entspringt wie beim zweiten Typus die Geißel von einem Basalkorn, das seinerseits häufig durch einen Rhizoplasten mit dem Caryosom eines Kernes in Verbindung steht. Dieser Kern ist aber nicht wie im ersten Falle der einzige Hauptkern, der dem ursprünglichen Kern der Flagellaten entspricht, sondern ein besonderer vom Hauptkern unabhängiger Geißelkern (Kinetonukleus oder Blepharoplast) (Fig. 18, 3). Wie Schaudinn zuerst gezeigt hat, entsteht nach der Befruchtung aus dem einen Kern durch heteropole Mitose an dem großen Pole der Hauptkern, am kleineren dieser zweite lokomotorische Kern (s. Artikel „Protozoa" Fig. 12). Die Bildung des Geißelkernes geschieht somit durch die erste heteropole Mitose, bei der jedoch beide Abkömmlinge dauernd ihren Kerncharakter bewahren, während beim zweiten Typus das eine Teilprodukt bis auf das Zentriol (Basalkorn) reduziert ist. Von dem Geißelkern aus wird dann in derselben Weise wie beim zweiten Typus vom ursprünglichen Kerne aus die Geißel durch zwei heteropole Mitosen mit reduzierten Zentren gebildet, so daß in diesem Falle die Geißel erst das Produkt der dritten Teilung darstellt. Bei der Teilung teilt sich der Geißelkern und der Hauptkern gesondert durch Mitose, die alte Geißel wird von dem einen Tochtertier übernommen, während in dem anderen vom Kinetonukleus eine neue gebildet wird.

Auch der vierte Typus der Geißelbildung ist wohl auf eine dreifache Teilung des lokomotorischen Zentrums zurückzuführen, jedoch mit dem Unterschiede, daß schon die erste Teilung nur einen reduzierten Kern, ein Basalkorn liefert (Fig. 18, 4). Die Genese dieses Typus ist noch nicht klar gelegt. Die Geißel entspringt in diesem Falle wie im zweiten und dritten von einem Basalkorn, das aber im Innern des Körpers durch eine Fibrille (Zentrodesmose) mit einem tief im Plasma liegenden zweiten Basalkorn verbunden ist. Der ganze Geißelapparat ist wie beim dritten Typ vollkommen vom Kerne unabhängig und wird bei der Fortpflanzung von dem einen Tochtertier übernommen, während das andere nach Teilung des Basal-

Digitized by Google

körpers von diesem aus sich einen neuen Geißelapparat bildet. Der Geißeltyp kommt bei den Euglenoideen eventuell auch bei Chilomonas vor.

Die hier vorgetragenen Auffassungen von der Genese des Geißelapparates der Flagellaten sind noch nicht allgemein anerkannt und es muß zugestanden werden, daß bei der großen Schwierigkeit der Aufklärung dieser kleinen Verhältnisse manches noch nicht sicher erwiesen ist. Das gilt besonders für die Entstehung des vierten Geißeltypus, während andererseits die Entstehung des zweiten und dritten an einigen, wenn auch wenigen Beispielen sicher nachgewiesen ist. Der Vorteil unserer Auffassung liegt vor allem darin, daß sie gestattet alle vorliegenden Beobachtungen in einfachster Weise einheitlich zu verstehen.

Auch Bau und Funktion der Geißeln erklärt sich leicht aus der hier allgemein angenommenen Art ihrer Entstehung. Bei der heteropolen Teilung des Zentriols entsteht eine Zentrodesmose, ein langer elastischer Faden (Gelfaden), der gegen die Zelloberfläche wächst und diese in einen dünnen Ueberzug ausstülpt. Soweit dieser Gelfaden im Innern des Flagellatenkörpers verläuft, wirkt er als festes formgebendes Element wie die Achsenstäbe, die nichts anderes sind als nicht freiwerdende ganz im Innern der Zelle verlaufende Zentrodesmen. Wird die Fibrille jedoch länger, so daß sie die Oberfläche zu einem dünnen Ueberzug mit auszieht, so wird sie zur Geißel, der Bewegungsorganelle. Letztere besteht also aus einer (oder mehreren) festen elastischen Fibrillen und einem dünnen Ueberzug aus flüssigem Protoplasma. Ein solcher Bau ist für einige größere Geißeln von Bütschli, Prowazek u. a. nachgewiesen (siehe Artikel „Protozoa" Fig. 5). Die dünne Protoplasmaschicht besitzt eine relativ große Oberfläche und reagiert daher sehr leicht und kräftig auf Aenderungen der Oberflächenspannung, sei es, daß dieselben aus dem umgebenden Medium stammen oder aus der Zelle selbst, wo sie durch Stoffwechselprozesse an den Verankerungsstellen der Geißeln, den Kernen oder Basalkörnern hervorgerufen werden können. Der dadurch ausgelösten Protoplasmaströmung wirkt die elastische Fibrille als Antagonist entgegen, so daß aus dem Zusammenwirken beider die schwingende Bewegung der Geißeln resultiert. Durch verschiedene Ausbildung der Fibrillen und Verwendung mehrerer Fibrillen in bestimmter Anordnung kann dann die Bewegung einer Geißel in ganz bestimmt geordneter Weise zustande kommen.

Wächst eine Geißelfibrille von einem tiefer im Plasma gelegenen Basalkorn oder Kinetonukleus aus nicht direkt aus der Oberfläche heraus, sondern parallel zur Längsachse der Zelle knapp unter der Oberfläche hin, so entstehen sogenannte undulierende Membranen, die bei der Bewegung dünne Protoplasmalamellen aus dem Körper herausziehen. Sie finden sich nur bei parasitischen Formen. Undulierende Membranen können auch noch in anderer Weise durch Verschmelzen einer Schleppgeißel mit dem Körper zustande kommen (Trypanoplasma und Trichomonas).

Viele Flagellaten können auch zeitweilig auf festen Unterlagen kriechende Bewegungen ausführen und zwar nackte Formen mit Hilfe von Pseudopodien, andere mit Hilfe der Schleppgeißel oder metabolischer Kontraktionen. Die Geißeln können auch zeitweilig vollkommen verloren gehen, so daß die Formen ganz nach Art von Amöben leben. Derartig amöboide Formen finden sich nicht nur bei Rhizomastiginen, sondern auch gelegentlich bei niederen Protomonadinen und, wie Scherffel und Pascher neuerdings gezeigt haben, ziemlich häufig bei Chrysomonaden. Bei letzteren kommen bemerkenswerterweise sowohl lobose und filose als retikulose Pseudopodien mit Körnchenströmung vor.

5. Fortpflanzung, Befruchtung und Entwickelung. Die Fortpflanzung (vgl. auch den Artikel „Fortpflanzung") findet fast allgemein bei den Flagellaten durch Zweiteilung im freibeweglichen Zustand statt, seltener durch ein- oder mehrfache Teilungen innerhalb von Cysten. Bei allen Euflagellaten handelt es sich dabei um Längsteilung (Fig. 19), bei den Dinoflagellaten meist um Querteilung. In den Fällen, in denen bei Euflagellaten Querteilungen beschrieben sind (meist Gehäuse besitzende Formen), liegen nur scheinbar solche vor, da hier während der Teilung eine Drehung der Tiere um 90° innerhalb des Gehäuses oder der alten Pellicula stattfindet. Der Körperteilung geht die Teilung des Kernes (eventuell auch der Basalkörper) voran. Genaueres über das Verhalten des Geißelapparates bei der Teilung wurde schon oben mitgeteilt. Zellmund und kontraktile Vakuole werden in der Regel von dem einen Tochtertier übernommen und in dem anderen im Plasma neugebildet. Die Chromatophoren und, wenn solche vorhanden, die Pyrenoide vermehren sich dagegen, soweit bekannt, nur durch Teilung und werden bei der Durchschnürung des Körpers dann mit verteilt. In einzelnen Gruppen kommen speziell bei parasitischen Formen (Binucleaten und Hypermastiginen) auch multiple Teilungen (Schizogonien) vor (Fig. 20). Bei Noctiluca findet sich eine multiple Knospung (genaueres s. S. 1225).

Digitized by Google

Befruchtungsvorgänge sind bei Flagellaten ziemlich selten nachgewiesen; nur bei den Phytomonaden (Volvocales) finden sich allgemein Befruchtungsakte und können

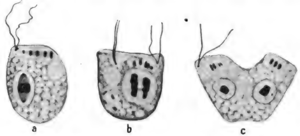


Fig. 19. Längsteilung von Cyathomonas truncata. Nach Hartmann und Chagas.

jederzeit leicht beobachtet werden. Hierbei treffen wir alle Uebergänge von isogamer Hologamie bis zu Merogamie und Oogamie (vgl. den Artikel „Algen"). Der einfachste

Fig. 20. Multiple Teilung von Trypanosoma lewisi. Nach Wasielewski und Senn.

Befruchtungsvorgang bei den übrigen Flagellaten ist von Dobell bei der Euglenoidee Copromonas nachgewiesen (Fig. 21). Es kopulieren zwei erwachsene Individuen (isogame Hologamie), wobei die Kerne durch zwei Teilungen sich reduzieren und die Reduktionskerne im Plasma der Gameten resorbiert werden. Unter Verlust der Geißel encystiert sich dann die Zygote. Bei Protomonadinen (resp. Chrysomonaden) ist eine entsprechende Befruchtung von Prowazek und Martin für Monasarten beschrieben, während bei Bodo lacertae Prowazek eine leicht anisogame Hologamie beobachtet hat, wobei in der Cystozygote nachher eine mehrfache metagame Teilung stattfindet. Auch für Trypanosomen ist ähnliche anisogame Kopulation angegeben, aber noch nicht ganz sichergestellt und vielfach angezweifelt. Bei den Endgliedern der Binucleatenreihe, deren Zugehörigkeit zu den Flagellaten aber vielfach noch bestritten wird, findet sich dagegen eine extreme Oogamie (Näheres s. S. 1205).

Auch eine typische Autogamie ist unter den Flagellaten bei Trichomastix lacertae durch Prowazek bekannt. Hier encystiert sich ein einziges Individuum. Die Produkte der ersten Kernteilung rücken auf gegenüberliegende Seiten, bilden durch zwei weitere Teilungen je zwei zugrundegehende Reduktionskerne und verschmelzen dann miteinander (Fig. 22). Bei Dinoflagellaten hat Dubosq neuerdings eine Merogamie beobachtet (über die eventuelle Merogamie

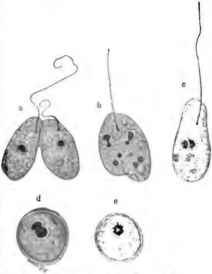


Fig. 21. Hologame Kopulation (isogam) von Copromonas subtilis Dobell. Nach Dobell. Aus Doflein.

Digitized by Google

bei Rhizomastiginen und Trichonymphiden s. unten S. 1189 u. 1210). Die aus früherer Zeit stammende Angabe einer Konjugation bei Noctiluca (Cystoflagellate) mit folgender multipler Knospung ist der Nachprüfung bedürftig, und es werden sich wahrscheinlich dabei die aus der letzteren hervorgehenden Schwärmer als Gameten erweisen, es wird also wie bei Dinoflagellaten eine Merogamie vorliegen.

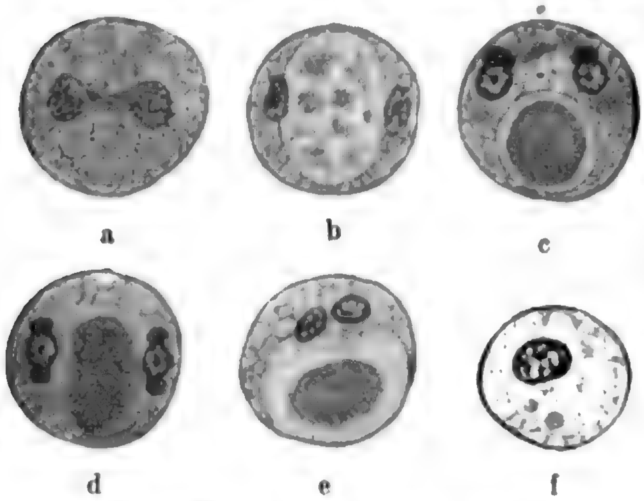


Fig. 22. Autogamie bei Trichomastix lacertae. a und b erste Kernteilung, und Auseinanderrücken der Kerne um den Glykogenkörper, c und d Reduktionsteilungen, e Aufeinanderrücken der Gametenkerne, f Zygote mit Synkaryon. Nach Prowazek. Aus Hartmann.

In der Regel sind bei den Flagellaten die Fortpflanzungs- und Befruchtungsvorgänge nur lose verknüpft, so daß kein festgelegter Generationswechsel zustande kommt. Nur bei einigen Formen (speziell Parasiten) mit komplizierterer Vermehrung (Schizogonie, spezifische Gametenbildung und besondere metagame Fortpflanzung) kommt es durch extreme Anpassung verschiedener Vermehrungsweisen an besondere biologische Verhältnisse zu einem solchen, der meist durch Verbindung mit einem Wirtswechsel noch weitere Komplikation erfährt.

B. Systematischer Teil.

I. Subklasse Euflagellata.

Während die Dino- und Cystoflagellaten einheitliche hoch spezialisierte Gruppen darstellen, die sich gut charakterisieren und scharf abgrenzen lassen, bieten die Euflagellaten oder Flagellaten im eigentlichen Sinne den denkbar größten Formenreichtum mit extremer Verschiedenheit der inneren und äußeren Organisation und Lebensweise. Beschaffenheit der Oberfläche, Organisation der Stoffwechselorganellen (Schlund, Vakuolen, Chromatophoren usw.), Kern- und Geißelapparat weisen fast sämtliche innerhalb der ganzen Klasse der Flagellaten vorkommenden Möglichkeiten auf, so daß zur Gesamtcharakteristik der Subklasse Euflagellaten nur die allgemeinen Charaktere der Klasse herangezogen werden können. Die einseitig differenzierte Ausbildung der Organisation, wie bei Dino- und Cystoflagellaten fehlt noch, dagegen finden sich bei den einzelnen Gruppen, die zueinander vielfach deutliche Beziehungen aufweisen, mannigfaltige Wege in der Entwickelung eingeschlagen. Trotz dieser Sachlage gelingt es, auf Grund der Organisation von Kern und Geißelapparat, sowie der sonstigen Organellen, vor allem der Oberflächenbeschaffenheit und der Stoffwechselorganellen (Schlund, Chromatophoren usw.), die Formen in ein einigermaßen natürliches System einzureihen.

Wir teilen die Euflagellaten in folgende Ordnungen:

1. **Rhizomastigina** Bütschli.
2. **Protomonadina** Blochmann em. Hartmann und Chagas.
3. **Binucleata** Hartmann.
4. **Hypermastigina** Grassi.
5. **Chromomonadina** Klebs.
   a) **Chrysomonadina** Stein.
   b) **Cryptomonadina** Stein.
6. **Chloromonadina** Klebs.
7. **Euglenoidina** Stein em. Klebs.
8. **Phytomonadina** Bütschli.

Diese Einteilung stellt einen weiteren Ausbau des Systems von Klebs dar, wie es Hartmann und Chagas speziell unter Berücksichtigung der Cytologie vorgeschlagen haben. In den Hauptpunkten stimmt es mit dem System von Senn überein, der mehr unter Berücksichtigung der Oberfläche und der Stoffwechselorganellen eine Revision vorgenommen hatte. Die wichtigsten Veränderungen betreffen die schon von Bütschli angenommene Aufstellung einer besonderen Ordnung (Rhizomastigina Bütschli) für die Mastigamöben, die Zusammenziehung der beiden Ordnungen der Protomonadina und Polymastigina als Protomonadina und die Abtrennung der Trypanosomen und Verwandten von den Protomonadinen und ihre Zusammenziehung mit einem Teil der früher zu den Sporozoen gerechneten Hämosporidien als Binucleata. Dem Vorschlage Grassis folgend sind zudem noch die hochkomplizierten parasitischen Flagellaten aus Termiten usw., die bisher meist als Trichonymphiden bezeichnet und den Flagellaten nur als Anhang angereiht wurden, als besondere Ordnung Hypermastigina hinzugefügt. Die 4 ersten Ordnungen besitzen eine rein animalische oder parasitische Lebensweise und haben nie Chromatophoren, die letzten ernähren sich ausschließlich oder

Digitized by Google

vorwiegend nach Art der Pflanzen. Die **Phytomonadina** führen in lückenloser Entwickelung zu den Grünalgen über und finden in diesem Handbuch im Artikel „Algen" ihre Darstellung.

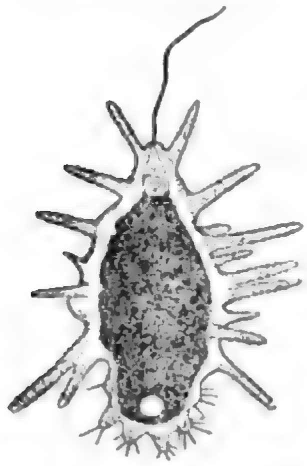


Fig. 23. Mastigamoeba aspera F. E. Schulze. Nach F. E. Schulze. Aus R. Hertwig.

1. Ordnung Rhizomastigina Bütschli.

Die Rhizomastiginen sind charakterisiert durch eine vollkommen nackte Oberfläche und die damit verbundene Fähigkeit sich durch Ausbildung von Pseudopodien nach Art der Amöben zu bewegen und Nahrung aufzunehmen, sowie durch den gleichzeitigen Besitz von Geißeln. Die ganze Gruppe ist nichts weniger als einheitlich; nur ganz wenige Formen sind genauer untersucht, so daß weitere Forschungen hier erst Aufklärung und Ordnung schaffen werden.

Meist handelt es sich um Amöben mit einer Geißel, doch sind auch zwei- und dreigeißelige Formen beschrieben. Die Geißel wird beim Kriechen bald nach vorn gerichtet, bald nachgeschleppt, bald dient sie zum Schwimmen, bald ist sie nur als Tastorgan ausgebildet und das Tier bewegt sich nur amöboid. Vielfach steht sie mit dem Kern in direkter Beziehung (Fig. 23), d. h. entspringt direkt aus dessen lokomotorischer Komponente; bei anderen Formen wird völlige Unabhängigkeit von dem Kern angegeben. Die Pseudopodien werden beim Schwimmen entweder beibehalten oder aber eingezogen.

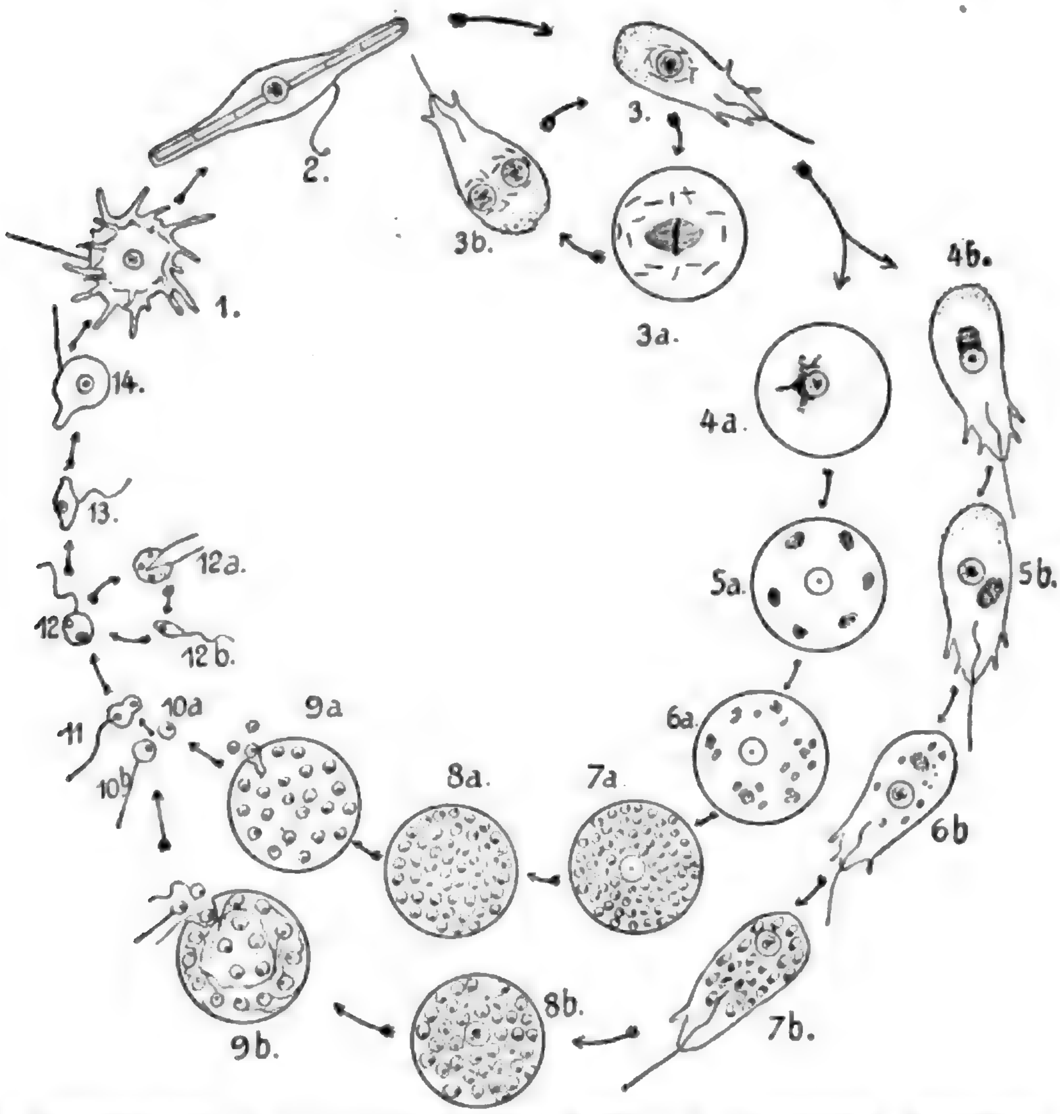


Fig. 24. Zeugungskreis von Mastigella vitrea Goldschm. 1 vegetatives Individuum. 2 dasselbe fressend, 3 dasselbe schwimmend, 3a und b Vermehrung, 4a bis 9a Makrogametenbildung, 4b bis 9b Mikrogametenbildung, 10 bis 11 Kopulation, 12, 12a und 12b metagame Vermehrung, 13 und 14 Wachstumstadien. Nach Goldschmidt. Aus Doflein.

Digitized by Google

Manche Arten weisen beim Schwimmen eine ganz bestimmte Gestalt auf. Charakteristisch für mehrere Arten ist das Vorkommen von Klebkörnern, deutoplasmatischen Gebilden von verschiedener Form, denen eine Bedeutung bei der Bewegung und der Bewältigung der Beute zukommt. Außerdem finden sie auch Verwendung bei der Bildung der Cystenmembran. Der Kern ist bei kleineren Formen ein einfacher Caryosom- oder Pseudocaryosomkern, bei größeren ist der Kernbau komplizierter und bildet eine Mitose mit distinkten Chromosomen. Die Fortpflanzung geschieht durch Teilung im amöboiden Zustande. Von zwei großen Formen (Mastigina setosa und Mastigella vitrea) ist von Goldschmidt eine komplizierte Entwickelung beschrieben worden mit Bildung von vielen Mikro- und Makrogameten innerhalb verschiedener Cysten und nach der Kopulation folgender besonderer metagamer Vermehrung (Fig. 24). Die Gametenkerne sollen dabei aus Chromidien im Protoplasma der Gameten entstehen und der eigentliche Kern soll als somatischer Kern zugrunde gehen (s. Fig. 24, 4 bis 9). Falls es sich hier nicht um eine Verwechselung mit Parasiten handelt, so müssen wir in diesen Arten Endglieder einer langen Entwickelung sehen; doch besteht kein Grund, sie dieser Entwickelung wegen von den Flagellaten zu trennen und den Rhizopoden anzureihen.

Die Systematik der Rhizomastiginen liegt noch sehr im argen. Cytologisch sind nur wenige Arten untersucht. Im folgenden seien einige in loser Aneinanderreihung beschrieben.

Gattung **Mastigamoeba** F. E. Schulze.

Rhizomastiginen mit einer direkt vom Kern entspringenden Geißel und meist deutlicher Sonderung von Ekto- und Entoplasma. Die Oberfläche ist oft mit feinen Borsten besetzt. Mastigamoeba aspera F. E. Schulze (Fig. 23).

Gattung **Mastigina** Frenzel.

Formen mit einer aus dem Kern entspringenden Geißel. Eine dicke Pellicula vorhanden. Körper walzenförmig, ohne fingerförmige Pseudopodien, Bewegung rollend.

Mastigina setosa Goldschmidt. Die Körperoberfläche dieser Form ist dicht mit langen Borsten besetzt, die die dicke Pellicula durchbohren und im Ektoplasma mit einem Knopf endigen. Sie sollen durch Auswachsen der Klebekörner entstehen. Größe bis 140 μ. Geschlechtliche Prozesse wurden von Goldschmidt angegeben.

Gattung **Mastigella** Frenzel.

Stark amöboide Formen mit einer oder mehreren Geißeln, die frei im Plasma endigen, ohne in Beziehung zum Kern zu treten.

Mastigella vitrea Goldschmidt (Fig. 24). Der Körper dieser Form ist vollkommen durchsichtig. Die Geißel ist über körperlang, kann aber in eine röhrenartige Scheide zurückgezogen werden und ist dann borstenartig. Sie wird nicht zum Schwimmen benutzt. Ueber ihre Genese ist leider nichts bekannt. Die Kernteilung ist mitotisch. Stäbchenartige Klebekörner sind vorhanden. Größe bis 150 μ. Auch für diese Form gibt Goldschmidt eine komplizierte geschlechtliche Entwickelung an (s. oben Fig. 24).

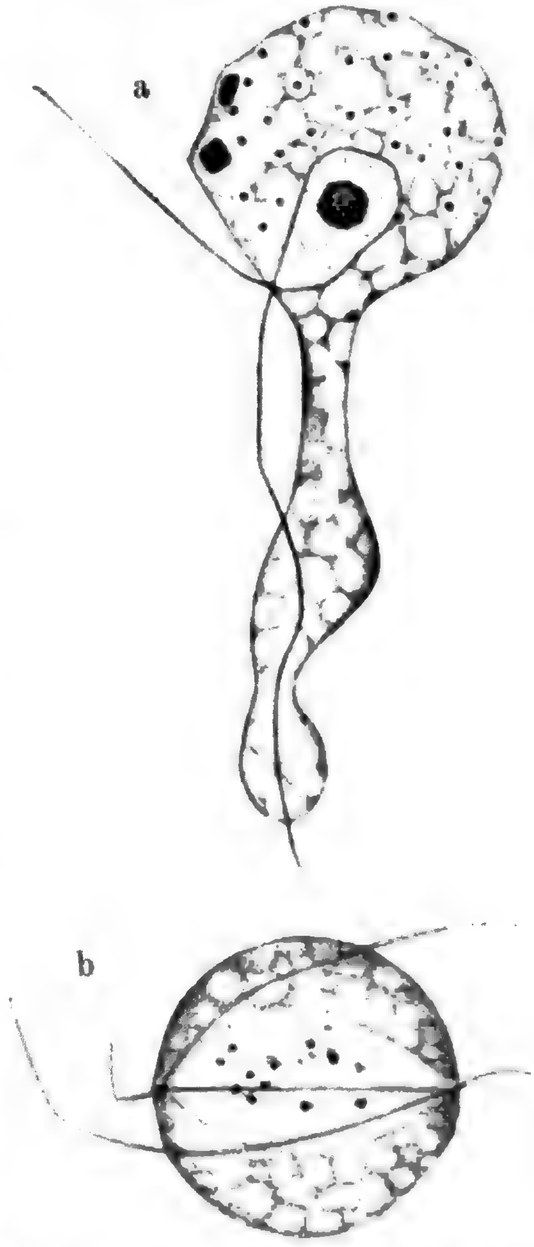


Fig. 25. Cercobodo spez. aus Rio de Janeiro a vegetativ, b Teilung. Original.

Gattung **Cercobodo** Krassilstschick.

Amöbenartige Organismen mit zwei Geißeln, von denen die eine zum Schwimmen, die andere als Schleppgeißel dient. Die Geißeln

Digitized by Google

entspringen von zwei direkt der Kernmembran innen anliegenden Basalkörnern, die zugleich die Zentriolen sind (Fig. 25). Im freischwimmenden Zustand besitzt Cercobodo gestreckte Gestalt, ohne Pseudopodien.

Gattung **Wasielewskia n. g.**

Kleine, in ihrer systematischen Stellung nicht ganz klare Formen. Sie leben den größten Teil ihres vegetativen Zustandes als amöbenartige Organismen ohne Geißeln und sind dann von echten Vahlkampfien (s. den Artikel „Rhizopoda") nicht zu unterscheiden. Nur vorübergehend und auf kurze Zeit bilden sie Flagellatenstadien mit 2 Geißeln. Die Kernteilung verläuft nach dem ersten Typus, wie er sowohl bei Protomonadinen wie auch bei Vahlkampfien üblich ist. Die Geißelinsertion ist die des zweiten Typus, es entspringt also die Geißel von einem Basalkorn, das mit dem Caryosom des Hauptkerns zuweilen durch einen Rhizoplasten verbunden ist. Die Vermehrung findet nur im Amöbenzustand statt. Geschlechtliche Vorgänge sind nicht bekannt. Vielleicht handelt es sich hier richtiger um rückgebildete Protomonadinen.

Gattung **Trimastigamoeba** Whitmore.

Aehnlich wie die vorige Gattung, jedoch nit 3 Geißeln. Trimastigamoeba philippinensis Whitmore (Fig. 26). . Im Flagellatenzustand länglich oval mit etwas zugespitztem Vorder- und breitem Hinterende. Eine dritte Geißel als Schleppgeißel.

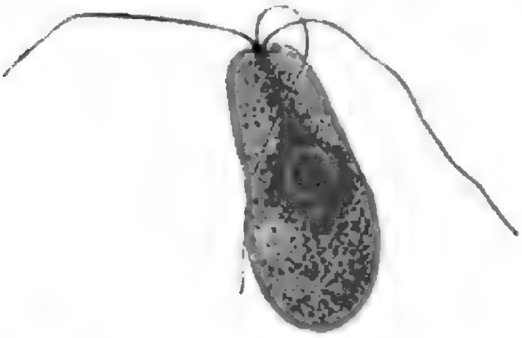


Fig. 26. Trimastigamoeba philippensis Withmore. Nach Withmore.

Zu den Rhizomastiginen werden ferner vielfach noch eine Anzahl Gattungen gestellt, deren Natur jedoch nicht aufgeklärt ist, so die Gattung Multicilia mit zahlreichen über die ganze Oberfläche verteilten Geißeln, ferner die Gattungen Pteridomonas und Actinomonas, erstere mit einem Kranz von einrollbaren, borstenartigen Cilien (?) an der Basis der einen Geißel, letztere mit feinen strahlenförmigen Pseudopodien. Diese drei Gattungen stehen wohl in keiner näheren Beziehung zu den typischen Rhizomastiginen; die beiden letzten erinnern noch am meisten an gewisse Rhizopodien aufweisende Chrysomonaden.

Die meist ebenfalls zu den Mastigamöben gezählte zweigeißelige Dimorpha mutans Gruber ist ihrer ganzen sonstigen Organisation nach eine typische Heliozoe und stimmt nach eigenen gelegentlichen Beobachtungen cytologisch vollkommen mit Acanthocystiden überein.

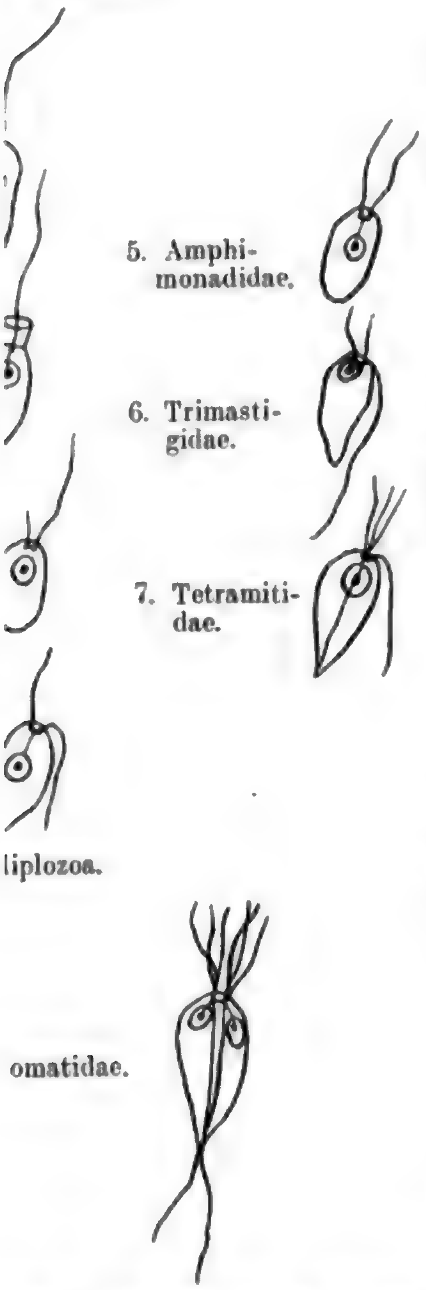
2. Ordnung **Protomonadina** Blochmann em. Hartmann und Chagas.

Die Protomonadinen stellen eine Gruppe kleiner und kleinster Formen dar. Sie besitzen sämtlich den zweiten Typ der Geißelinsertion, d. h. die Geißeln entspringen von einem oder mehreren Basalkörnern, die mit dem lokomotorischen Zentrum des Kernes, zu dem sie in genetischer Beziehung stehen, durch einen Rhizoplasten verbunden sein können. Sie gehen vielfach bei der Teilung zugrunde und werden dann wieder neu gebildet. Bei den höheren Formen bleiben sie jedoch erhalten, werden mitverteilt und vom Basalkorn aus ergänzt. Letztere teilen sich dabei selbständig, ja sie können direkt als Teilungszentren des Kernes fungieren (Monas termo, Trichomonas). Auch im Kernbau weichen diese Formen etwas ab. Während wir im allgemeinen bei den Protomonadinen den ersten Kerntypus haben, zeigen die Trichomonaden den vierten Typus (vgl. Fig. 13). Die Nahrungsaufnahme findet nur an besonders ausgebildeten Mundstellen statt; sie wird zuweilen durch Schlund- oder Kragenbildungen unterstützt. Kontraktile Vakuolen sind in Ein- oder Zweizahl vorhanden. Die Pellicula ist zart und gestattet manchmal noch amöboide Bewegungen. Weit verbreitet sind Gehäuse- und Gallertausscheidung, ebenso Koloniebildung. Bei manchen dieser Formen dient die Schleppgeißel zum Festhalten im Gehäuse; undulierende Membranen kommen bei parasitischen Formen vor. Chromatophoren finden sich in der ganzen Ordnung nicht.

Der großen Mehrzahl der Protomonadinen mit einfachem Bau steht eine Anzahl von Formen gegenüber, die eine eigentümliche Doppelbildung zeigen. Sie besitzen sämtliche Zellorganellen mit Einschluß des Kernes doppelt (Familie Distomatidae). Die Formen werden daher als diplozoe Protomonadinen sämtlichen übrigen Familien als monozoen gegenübergestellt. Senn trennt sie sogar als besondere Ordnung von den Protomonadinen ab. Da sie jedoch cytologisch sowie in der sonstigen Ausbildung der Organellen sich (mit Ausnahme der Doppelnatur) von den Protomonadinen in nichts unterscheiden, ziehen wir ihre Einreihung bei diesen vor. Die weitere syste-

Digitized by Google

›derung findet auf Grund der
; der Geißeln statt und ist am
ıchfolgendem Schema (Fig. 27)



hema der Familien der Proto-
monadinen.

a) monozoa.

Cercomonadidae Kent em.
Bütschli.

ge Formen von ovaler oder
estalt, Nahrungsaufnahme am
loch ist kein Schlund ausgebildet,
ufnahme erfolgt durch Vakuolen-
der Geißelbasis oder durch
ı. Die Pellicula ist sehr zart
daher weitgehende Metabolie

resp. Bildung von Pseudopodien. Die Basalkörner stehen durch einen Rhizoplast mit dem Caryosom des typischen Caryosomkernes in Verbindung. Ruhecysten vorhanden, Sexualität unbekannt.

Gattung **Cercomonas** Duj. em. Hartmann und Chagas,

Formen mit langausgezogenem Hinterende, das durch einen vom Caryosom ausgehenden Achsenstab bedingt ist.

Cercomonas parva Hartmann und Chagas (s. Fig. 1 S. 1179). Bis 20 μ große Form; Körper verhältnismäßig stark amöboid. Bei der Teilung, die sehr primitiv verläuft, werden Achsenstab und Geißel eingeschmolzen. Die Geißel wird dann vom Kern (Zentriol) aus neu gebildet, während der Achsenstab wahrscheinlich die erhalten bleibende Zentrodesmose zwischen den beiden Tochterkernen ist.

2. Familie **Craspedomonadidae** Stein.

Sehr kleine Monas-ähnliche Flagellaten. Am Vorderende besitzen sie 1 oder 2 geschlossene protoplasmatische Kragen, die der Nahrungsaufnahme dienen; die Nahrung wird an der äußeren Basis des Kragens von einer Empfangsvakuole aufgenommen; die Defäkation findet durch den Kragen statt. Die Pellicula ist auch hier sehr zart und erlaubt zuweilen amöboide Bewegung. Die Kern- und Geißelverhältnisse sind dieselben wie bei den andern einfachen Protomonadinen (Fig. 27). Zum Teil sind die

Fig. 28. Monosiga ovata. Nach Hartmann und Chagas.

Fig. 29. Diplosigopsis entzii Francé. Nach Francé. Aus Lang.

Craspedomonadiden freischwimmende, zum Teil festsitzende Formen. Koloniebildung und Bildung gelatinöser oder chitiniger Gehäuse ist sehr häufig. Die Teilung ist wie bei allen Euflagellaten eine Längsteilung:

Digitized by Google

bei ihr wird auch der Kragen der Länge nach durchgeschnürt.

Die Einteilung erfolgt nach der Anzahl der Kragen und der Bildung von Gehäusen und Kolonien. Als Beispiel seien genannt:

Monosiga ovata S. K. Mit oder ohne kurzen protoplasmatischen Stiel mit bedeutender Befähigung zur Pseudopodienbildung (Fig. 28).

Diplosigopsis entzii Francé (Fig. 29), ebenfalls einzellebende Form mit 2 Kragen und chitinigem Gehäuse.

Polyoeca dichotoma Kent; koloniebildende Form mit Gehäuse.

Augenfleck, zuweilen Leukosin als Stoffwechselprodukt. Diese Formen (vielleicht die ganze Familie) sind wohl farblos gewordene Chrysomonadinen, mit denen sie auch im Bau ihrer Cysten (Fig. 31) übereinstimmen (Scherffell). Für Monas vivipara und Monas termo ist bei der Cystenbildung Kopulation beobachtet, eine isogame Hologamie. Die Zellen sind nackt oder scheiden eine schleimige Hülle aus, Koloniebildung auf gallertigen Stielen.

Gattung **Monas** Stein.

Nackte einzellebende Flagellaten mit

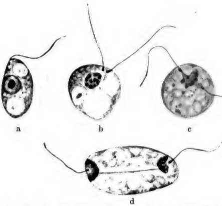


Fig. 30. Monas termo Ehr. Teilungsstadien. Nach Martin.

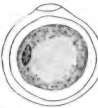


Fig. 31. Kopulationscyste von Monas termo. Nach Martin.

3. Familie **Monadidae** Stein em. Senn.

Einzeln oder zu Kolonien vereinigte Flagellaten mit einer langen Hauptgeißel am Vorderende, neben der meist 1 oder 2 kleine Nebengeißeln sich finden. An der Geißelbasis befindet sich eine Mundstelle zur Aufnahme geformter Nahrung; über dieser Mundstelle zuweilen noch ein kurzer lippenartiger Fortsatz. Geißelinsertion und Kernverhältnisse liegen meist wie bei den bisher besprochenen Familien. Doch kommt hier auch schon eine abgeleitetere Form des Kernbaues und der Geißelinsertion vor. Dabei liegt die lokomotorische Kernkomponente nicht im Caryosom, sondern findet sich in Form einer Platte an der an dieser Stelle zu einem Fortsatz ausgezogenen Kernmembran (Monas gelatinosa, nach Nägler) oder aber das Basalkorn fungiert als Zentriol bei der Kernteilung (Monas [Oicomonas] termo, nach Martin; Fig. 30). Bei manchen Formen findet sich ein roter

schwach amöboidem Körper; am Hinterende öfter ein fadenförmiges Pseudopodium, mit dem sich die Zelle festsetzt, einzeln und koloniebildend.

Monas termo Ehrenb. Körper oval bis kugelig, 5 bis 9 μ groß, am Vorderende lippenartig vorgezogen. Eine Geißel an der Basis der Lippe entspringend. Teilung und Copulation siehe oben. In verschmutzten Gewässern häufig.

Monas vivipara Ehrenberg, einzellebend und freischwimmend. Besitzt einen roten Augenfleck und eine schleimige Hülle. 1 Haupt- und 2 Nebengeißeln.

Gattung **Anthophysa** Bony.

Koloniebildend auf biegsamen, meist braun gefärbten Gallertstielen. Bei einer Art der Gattung (Anthophysa steinii) findet sich ein Augenfleck. Bei starker Beleuchtung lösen sich die Kolonien von den Stielen und schwimmen frei umher.

Digitized by Google

Anthophysa vegetans O. F. M. Köpfchenförmige Kolonien (Individuen mit 1 Nebengeißel) auf verzweigten Gallertstielen.

4. Familie **Bodonidae** Bütschli.

Die Familie ist in letzter Zeit sehr umstritten worden. Neuere cytologische Arbeiten zeigten nämlich, daß unter dem Namen Bodo bisher zwei verschiedene Flagellaten zusammengefaßt waren. Einmal echte Bodoarten mit einem einzigen Kern, dann aber auch äußerlich ganz ähnlich aussehende Arten, die sich jedoch von den ersteren durch den Besitz eines zweiten Kernes, des Geißelkernes, scharf unterscheiden. Für die letzteren Formen wurde die Gattung Prowazekia neu geschaffen und der Ordnung der Binucleaten eingefügt. Diese Einteilung ist noch nicht von allen Forschern angenommen, kann aber nach den bisherigen Untersuchungen als gesichert gelten. Andere Forscher, z. B. Doflein, erkennen die Berechtigung der neuen Gattung zwar an, lassen sie aber zusammen mit einem Teil der übrigen zweikernigen Formen in der Familie der Bodoniden. Es ist aber wohl vorzuziehen, die Gattungen Prowazekia, Trypanoplasma von hier zu entfernen und mit den übrigen zweikernigen Formen der Ordnung der Binucleaten zu vereinigen. Hiernach sind die Bodoniden bis 30 μ lange, einkernige Flagellaten, mit 2 Geißeln, einer Schwimmgeißel und einer sehr langen Schleppgeißel. Die äußere Gestalt ist im allgemeinen ziemlich fest, doch ist für manche Arten auch Uebergang in amöboide Formen angegeben. Einige Arten leben parasitisch, aber auch freilebende Arten sind bekannt. Häufig kommt bei echten Bodoniden neben dem Kern noch ein zweiter mit Kernfarbstoffen sich intensiv färbender Körper vor; nähere Prüfung hat aber ergeben, daß es sich hier um einen glykogenartigen Reservestoffkörper handelt. Gehäusebildung ist von 2 Gattungen bekannt. Dieselben weichen durch die Bildung eines lippenartigen Fortsatzes oder einer kurzen plasmatischen Membran etwas von der Gattung Bodo ab, weshalb sie von Senn und anderen als eigene Familie der Bicosoecidae betrachtet werden. Ihrer ganzen Organisation nach sind sie aber echte Bodoniden (Lauterborn, Prowazek). Sie sitzen einzeln oder zu Kolonien vereinigt in Gehäusen, die oft gestielt sind. Am Grunde des Gehäuses sind sie mit der Schleppgeißel befestigt. Ob die Gattung Poteriodendron hierher gehört, ist nicht ganz sicher, da noch nicht nachgewiesen ist, ob der Stiel, auf dem die Zellen in ihrem Gehäuse festsitzen, wie bei Bicosoeca die Schleppgeißel oder ein einfacher plasmatischer Fortsatz ist. Dagegen ist die bisher als 3- oder 4-geißliche Form angesehene parasitische Costia wohl hier einzureihen.

Gattung **Bodo** Stein.

Bodo lacertae Grassi (Fig. 32). Die Form ist im Enddarm der Eidechsen regelmäßig in großer Zahl anzutreffen. Sie besitzt eine lanzett- oder keilförmige Gestalt und der hintere Abschnitt ihres Körpers ist von rechts nach links zu einer halben bis ganzen Spirale gedreht. Sie kommt in 2 Typen vor: einem mehr schlanken mit bläschenförmigem Kern und einem mehr gedrungenen mit kompakterem Kern und sogenanntem Chromidialkörper. Die erstere Form vermehrt sich in kugeligen Vermehrungscysten, die zweite Form durch Längsteilung in freibeweglichem Zustande. Ueber Kopulation und metagame Vermehrung s. oben S. 1187.

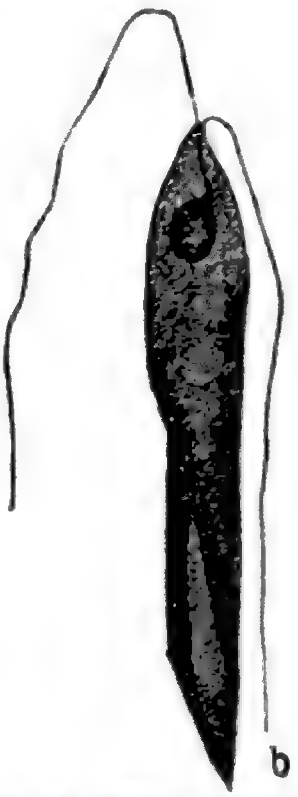


Fig. 32. Bodo lacertae Grassi. a Form ohne Glykogenkörper. Nach Prowazek. Aus Hartmann.

Gattung **Bicosoeca** Clark.

Ovale metabolische Formen mit lippenförmigem kontraktilem Fortsatz am Vorderende. Schleppgeißel als Stiel umgewandelt. Einzeln und koloniebildend.

Bicosoeca socialis Lauterborn (siehe Fig. 16, S. 1184). Koloniebildende Form.

Gattung **Costia** Leclerg.

Costia negatrix (Henneguy; Fig. 33). Für Costia sind bisher zum Teil 3, zum Teil 4 Geißeln angegeben; nach unveröffentlichten Untersuchungen von G. Entz jun. ist es jedoch eine zweigeißliche Form und die höheren Geißelzahlen beziehen sich auf frühe Teilungsstadien. Die Gestalt ist etwa oval, nach vorn dorsoventral abgeplattet. Auf der Ventralseite liegt am Vorderende

Digitized by Google

eine große tiefe Grube, die zusammengefaltet werden kann und so das Tier an seinem Wirt befestigt. Beim Schwimmen werden die Geißeln nachgeschleppt; sie sind von ungleicher Länge und Funktion. Costia ist ein gefürchteter Parasit unserer Süßwasserfische. Sie bedecken in großen Massen die Haut und nähren sich hier von zerfallenden Epithelzellen. Die Infektion verläuft meist tödlich. Im freien Wasser geht der Parasit, der an das Leben in der Epidermis offenbar sehr angepaßt ist, bald zugrunde.

Fig. 33. Costia negatrix. Nach einer unveröffentlichten Abbildung von G. Entz jun.

5. Familie **Amphimonadidae** Kent em. Bütschli.

Die Amphimonadiden unterscheiden sich von den sonst gleich organisierten Monadiden durch den Besitz zweier gleich langer, nach vorn gerichteter Geißeln. Außer mit den Monadiden und Bodoniden dürften sie auch mit den zweigeißeligen Formen der Chrysomonaden verwandt sein. Soweit sie nicht in Gehäusen leben, sind sie zu stark metabolischen und amöboiden Bewegungen befähigt. Die Nahrungsaufnahme geschieht durch Vakuolenbildung.

Gattung **Diplomita** Kent.

Diplomita socialis Kent. Gehäusebewohnende, gestielte Form mit rotem Augenfleck (verwandt mit den Chrysomonaden).

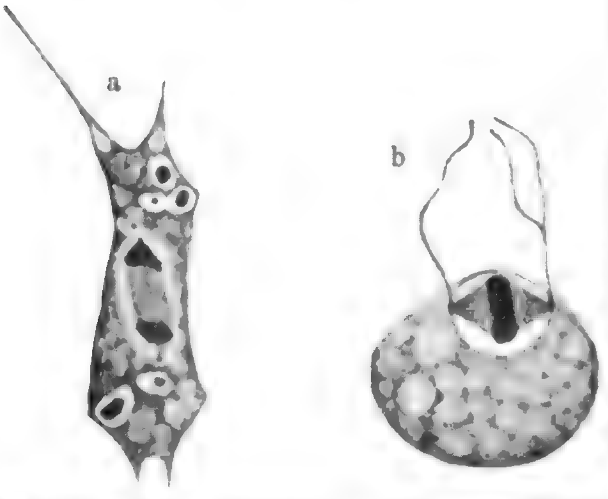


Fig. 34. Spongomonas uvella. a amöboide Form, b Geißelform, Kern in Teilung. Nach Hartmann und Chagas.

Gattung **Spongomonas** Stein.

Bildet aus körniger Gallerte bestehende große Kolonien von verschiedener Form (siehe Fig. 3, S. 1180). Verlassen die einzelnen Tiere ihre Hüllen, so zeigen sie sich sehr amöboid mit spitzen, fadigen Pseudopodien, können sogar ihre Geißeln abwerfen und in diesem Zustand einige Zeit verweilen (Fig. 34a).

Spongomonas uvella Stein. Bis 3 cm große kugelige oder sackförmige Kolonien. Kernteilung siehe Fig. 10, S. 1182. Die Geißeln werden vor der Teilung abgeworfen und entstehen von neuem aus dem Kern, eventuell schon auf dem Stadium der Aequatorialplatte von den Zentriolen aus (Fig. 34b).

6. Familie **Trimastigidae** Senn.

Formen mit 3 Geißeln, die am Vorderende entspringen.

Die Familie wird in mehrere Gattungen eingeteilt, doch sind sämtliche hierhergehörende Formen sehr wenig untersucht und in ihrer systematischen Stellung durchaus zweifelhaft.

Eine sichere Trimastigide ist wohl Dallingeria und Trimastix marina Kent, ferner das kürzlich von Alexeieff beschriebene Flagellat aus dem Darm eines Fisches Trimitus motellae Fig. 35).

Fig. 35. Trimitus motellae Alexeieff. Nach Alexeieff.

7. Familie **Tetramitidae** Bütschli.

Ausgezeichnet durch den Besitz von vier am Vorderende entspringenden Geißeln. Eine davon kann als Schleppgeißel oder als undulierende Membran ausgebildet sein. Der Körper ist nackt und daher stark metabol. Koloniebildung kommt in dieser Familie nicht vor. Geschlechtliche Vorgänge sind mit Sicherheit nur bei Trichomastix lacertae beschrieben, die sich als Autogamie darstellen (vgl. Fig. 23, S. 1188).

Digitized by Google

Gattung **Monocercomonas** Grassi.

Parasiten aus dem Darm verschiedener Tiere (Insekten, Reptilien, Amphibien). Formen mit 4 Geißeln und 1 Achsenstab.

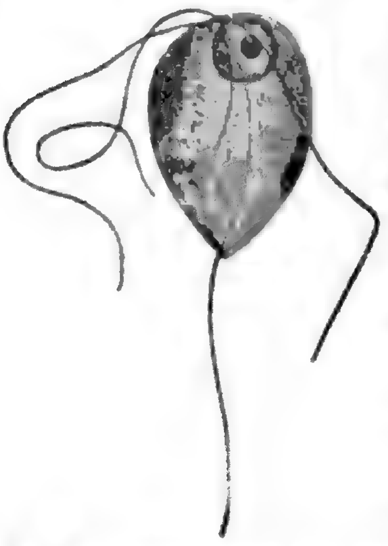


Fig. 36. Monocercomonas melolonthae Grassi. Nach Jollos. Aus Doflein.

Monocercomonas melolonthae Grassi (Fig. 36). Parasit aus der Larve von Melolontha. Der Achsenstab wird von den Basalkörnern aus gebildet.

Gattung **Trichomonas** Donné.

Hochentwikkelte und sehr spezialisierte Darmparasiten, ausgezeichnet durch 3 nach vorn gerichtete Geißeln und eine spiralig über den Körper nach hinten verlaufende undulierende Membran. Die Membran ist durch eine Fibrille und eine aus einer Körnerreihe bestehende chromatische Basis gestützt. Von den Basalkörpern geht ein aus 2 Fibrillen zusammengesetzter Achsenstab aus. Der Kern besitzt einen starken Außenkern und nur zeitweise ein Caryosom (Pseudocaryosom). Die undulierende Membran kann unter schädigenden Einflüssen sehr leicht vom Körper losgelöst werden und als 4. Geißel erscheinen oder auch ganz abgestoßen werden. Häufig werden auch normalerweise sämtliche Geisseln abgeworfen, und das Tier, dessen Körper sowieso sehr metabol ist, bewegt sich amöboid. Neuerdings sind auch Formen mit 4 Geißeln und einer undulierenden Membran beschrieben worden (Alexeieff). Bei der Kernteilung werden bestimmte Chromosomen (8) ausgebildet und die Pole der Spindel werden von den Basalkörnern eingenommen, die durch eine Zentrodesmose verbunden sind. Letztere wird dann eingeschmolzen und durch eine besondere Teilung der Basalkörper werden die neuen Achsenstäbe gebildet (siehe Fig. 13, S. 1183). Am Vorderende liegt ein sichelförmiges Cytostom. Geschlechtliche Vorgänge sind bisher mit Sicherheit nicht beobachtet. Trichomonaden sind als Darmparasiten außerordentlich verbreitet. Pathogene Bedeutung kommt ihnen wohl nicht zu.

Von den sehr zahlreichen Arten seien genannt: Trichomonas hominis Donné. Harmloser Darmparasit des Menschen, vor allem bei alkalischer Reaktion des Darminhaltes in Mengen vorkommend.

Trichomonas vaginalis Davaine. Ebenfalls ein menschlicher Parasit. Er findet sich im Schleim der Vagina bei saurer Reaktion. Vereinzelt wird er auch in der männlichen Urethra gefunden als Begleiterscheinung anderer Erkrankungen. Bei Frauen findet er sich in etwa 30 bis $40^0/_0$; er bildet einfache Dauercysten.

Trichomonas muris (siehe Fig. 13). Sie findet sich stets im Blinddarm der Maus, oft in solchen Massen, daß der ganze Inhalt aus Trichomonaden zu bestehen scheint.

Gattung **Trichomastix** Blochmann.

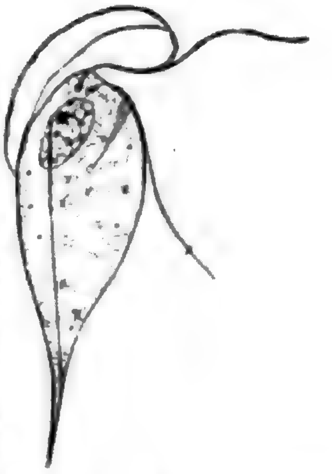


Fig. 37. Trichomastix lacertae Bütschli. Nach Prowazek. Aus Hartmann.

Aehnlich organisiert wie die Gattung Trichomonas; an Stelle der undulierenden Membran besitzt Trichomastix eine Schleppgeißel, auch sonst ist sie einfacher gebaut; der Stützapparat für die undulierende Membran fehlt, da ja hier dieselbe durch eine freie Schleppgeißel ersetzt ist.

Trichomastix lacertae Bütschli (Fig. 37). Häufig in der Kloake bei Eidechsen. Autogamie siehe Fig. 23, S. 1188.

Gattung **Fanapepea** Prowazek.

Fanapepea besitzt einen Trichomonasähnlichen Bau; doch läuft bei ihm die undulierende Membran nicht über den ganzen Körper, sondern befindet sich in dem — sehr großen — Cytostom.

Fanapepea mesnili Wenyon. Wurde im Darm des Menschen gefunden.

Auch bei Batrachiern kommen Angehörige der Gattung vor.

b) diplozoa.

8. Familie **Distomatidae** Klebs.

Die Distomatiden stellen eine durch ihre meist bizarre Gestalt sehr auffallende Gruppe dar. Es sind bei ihnen in merkwürdiger Weise mehrere oder alle Zellelemente verdoppelt, so daß sie den Eindruck machen, als seien sie aus 2 Zellen zusammengesetzt. Ueber die Bedeutung dieser Erscheinung ist nichts bekannt. Sie besitzen 2 bis 8 Geißeln, die stets in 2 gleiche Gruppen verteilt an symmetrischen Stellen der Zelle sitzen.

Digitized by Google

Gattung **Trigonomonas** Klebs.

Trigonomonas compressa Klebs (Fig. 38). Freilebende Form von dreieckiger Gestalt, stark abgeflacht, vorn breit und abgerundet, hinten zugespitzt. Beiderseits je 3 ungleich lange Geißeln und an jeder Seite 1 Cytostom. Der Kern wird als in der Mitte bisquitförmig eingeschnürt angegeben; es wird sich wohl sicher um 2 Kerne handeln.

Fig. 38. Trigonomonas compressa Klebs. Nach Klebs. Aus Senn.

Gattung **Trepomonas** Duj.

Von eigenartiger Gestalt. Jederseits 4 Geißeln, 1 lange und 3 kurze symmetrisch in den beiden Mundtaschen angeordnet. Die 2 Mundtaschen liegen auf verschiedenen Seiten des Tieres; wenn also die rechte Tasche dem Beschauer zugekehrt ist, liegt die linke unten. 2 Kerne schon von Bütschli und Dangeard beschrieben.

Trepomonas agilis Duj. Mit den Charakteren der Gattung. Freilebend.

Trepomonas intestinalis Alexeieff (Fig. 39). Darmparasit.

Fig. 39. Trepomonas intestinalis Alexeieff. Nach Alexeieff.

Gattung **Octomitus** Prowazek.

Kleine meist längliche Flagellaten, zuweilen sehr metabolisch. Am Vorderende entspringen von getrennten Basalkörpergruppen je 3 Geißeln und je 1 Achsenstab. Die Achsenstäbe ziehen durch den ganzen Körper und treten hinten als Schleppgeißeln aus. Unter den Basalkörpern im Vorderende 2 Kerne, durch einen Rhizoplasten mit ihnen verbunden. Da die Darmparasiten-Arten aus Säugetieren häufig mit Lamblien zusammen vorkommen, hat man auf eine Zusammengehörigkeit zwischen beiden geschlossen und Octomitus für die Jugendform der Lamblia gehalten. Bei der großen Aehnlichkeit in der Organisation ist das sehr wohl möglich, doch ist es bis jetzt nicht nachgewiesen.

Octomitus intestinalis Duj. (Fig. 40). Schlanke Art aus dem Darm von Batrachiern und Tritonen. Bei der Kernteilung teilen sich beide Kerne gleichzeitig. Das Verhalten der Geißeln während der Teilung ist nicht klar.

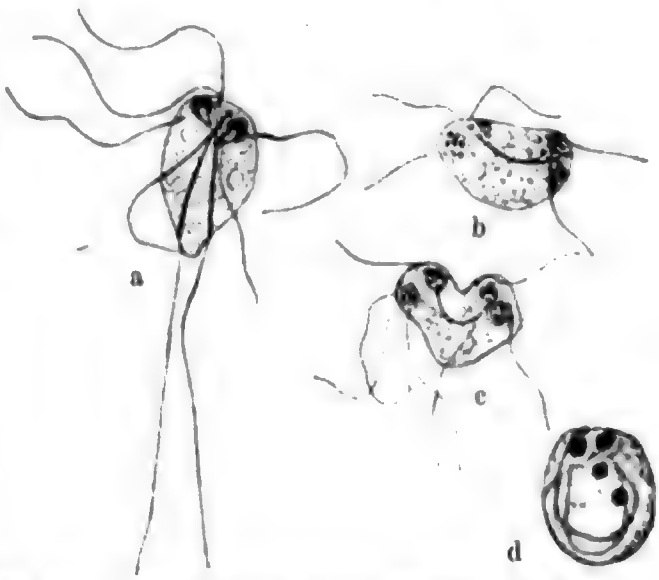


Fig. 40. Octomitus intestinalis. Nach Alexeieff.

Die freilebenden Gattungen Hexamitus und Urophagus sind ebenso organisiert, jedoch mit zwei in der hinteren Körperpartie auf gegenüberliegenden Seiten befindiichen Mundöffnungen.

Gattung **Lamblia** Blanchard.

Breite Flagellaten mit bilateralsymmetrischem Bau. Die Gestalt ist etwa birnförmig und wird durch ein kompliziertes Fibrillensystem erreicht. Auf der Ventralseite findet sich am Vorderende eine napfartige Vertiefung, die sogenannte Sauggrube. Mit ihr saugt sich das Tier auf dem Dünndarmepithel fest. Die Organisationsverhältnisse sind dieselben wie bei Octomitus, doch ist die Anordnung der Geißeln eine andere; hierdurch wird eben die komplizierte Gestalt erreicht. Die Lagerung der Geißeln und Fibrillen sieht man am besten in der Figur 2, S. 1180. Abweichend von Octomitus ist das Vorkommen eines Chromidialkörpers. Ueber seine Zusammensetzung und Herkunft ist nichts bekannt; es handelt sich, da er in den Cysten resorbiert wird, wahrscheinlich um Reservestoffe. Teilung im freien Zustand ist nicht beobachtet, doch finden sich wahrscheinlich Befruchtungsprozesse mit nachfolgender Vermehrung in den Cysten.

Lamblia intestinalis Lambl. Im Dünndarm des Menschen. Bei der Encystierung kopulieren nach Schaudinn und Prowazek zwei Tiere; die weiteren Vorgänge sind nicht bekannt.

Digitized by Google

Lamblia muris Bensen. Im Dünndarm der Maus. Hier encystiert sich nur ein Tier, in der Cyste findet eventuell ein autogamer Befruchtungsprozeß statt.

Lamblia sanguinis Gonder. Im Herzblut eines blauen Falken.

3. Ordnung **Binucleata** Hartmann.

Unter diesem Namen faßte Hartmann alle durch den Besitz zweier verschiedener Kerne, eines Haupt- und eines Geißelkernes (Kinetonukleus) ausgezeichneten Flagellaten zusammen unter Einbeziehung der bisher als Sporozoen betrachteten Hämosporidien. Wenn letztere auch durch ihren intrazellulären Parasitismus in roten Blutkörperchen keine Geißel mehr aufweisen und nicht mehr ohne weiteres den Eindruck von Flagellaten machen, so erweisen sie doch durch den zeitweiligen Besitz eines Kinetonukleus und durch das Auftreten von Flagellatenstadien ihre Zugehörigkeit zu den Binucleaten (neuerdings vielfach bestritten). Die typischen und einfachsten Vertreter der Familie sind kleine Flagellaten, die äußerlich einfachen Protomonadinen gleichen. Sie unterscheiden sich von diesen aber scharf dadurch, daß das Basalkorn ihrer Geißel nicht wie dort direkt aus dem Kern abstammt, sondern daß zwischen beide, wie gesagt, noch ein zweiter selbständiger Kern eingeschaltet ist, der Kinetonukleus (Blepharoplast), dem die Aufgabe der Geißelbildung zufällt. Ueber die Genese der Geißel wurde oben (S. 1185) schon berichtet (3. Geißeltyp). An der Spitze auswachsender Geißeln kann man häufig noch eine knopfartige Verdickung sehen, das die Geißel liefernde Teilprodukt des Basalkornes (Fig. 41);

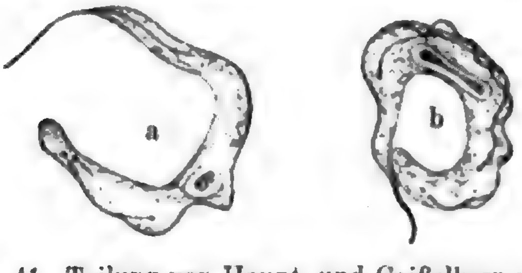


Fig. 41. Teilung von Haupt- und Geißelkern und Entstehung der 2. Geißel bei Trypanosomen. Nach Rosenbusch.

bei manchen Leptomonaden ist diese Verdickung des Geißelendes sogar dauernd auf gewissen Stadien zu sehen.

Bei der Teilung — die Teilung der einfachen Formen ist eine typische Längsteilung — teilen sich Kern und Kinetonukleus gesondert und unabhängig voneinander auf mitotischem Wege. Die alte Geißel bleibt dabei erhalten und wird von der einen Tochterzelle übernommen (Fig. 41). Das Basalkorn fungiert häufig als Zentriol der Kinetonukleusspindel. Die Desmose der Kinetonukleusteilung kann als Achsenstab nach der Teilung erhalten bleiben. Schon bei den einfachen typischen Flagellatenformen können neben Längsteilungen auch multiple Teilungen vorkommen (Tr. lewisi, siehe Fig. 20, S. 1187), bei den abgeleiteten, meist geißellosen Formen ist das die Regel.

Sämtliche Binucleaten — mit Ausnahme der freilebenden Gattung Prowazekia — sind extreme Parasiten mit osmotischer Ernährung. Dieser Parasitismus hat zu allerhand Anpassungserscheinungen geführt, die ihr Ende darin erreichen, daß bei den entwickeltsten Formen (intrazelluläre Parasiten) ein teilweiser oder gar ganzer Verlust der Flagellatenorganisation eintritt. Diese Rückbildung des Geißelapparates läßt sich stufenweise bei den einzelnen Gattungen verfolgen. Er geht meist mit der Ausbildung multipler Vermehrung Hand in Hand. Bei den primitiven Familien (Trypanosomiden und Babesien) sind einfache Befruchtungsvorgänge beschrieben, aber noch nicht ganz sichergestellt; bei den extrem entwickelten Halteridien und Plasmodien findet sich allgemein hochausgebildete Oogamie verbunden mit einem ausgeprägten Generations- und Wirtswechsel (näheres s. unten S. 1205). Diese Entwickelungstendenzen machen sich in der ganzen Binucleatenreihe bemerkbar und liefern so Schritt für Schritt alle Uebergänge von den einfachen Leptomonasformen bis zu den komplizierten, auf den ersten Anblick an Coccidien erinnernden Hämosporidien.

1. Familie **Trypanoplasmidae** Hartmann und Sollos.

Die Familie umfaßt zwei Gattungen, von denen die eine zahlreiche Blut- und Darmparasiten niederer Tiere enthält, während die andere die einzige freilebende Gattung der Binucleaten darstellt. Im Gegensatz zu allen anderen Angehörigen der Ordnung sind die Trypanoplasmiden durch den Besitz von zwei Geißeln ausgezeichnet, einer Schwimmgeißel und einer Schleppgeißel, die bei den parasitischen Arten zur undulierenden Membran geworden ist. Geschlechtliche Vorgänge sind von den freilebenden Formen nicht bekannt geworden, von den anderen sind sie mehrfach beschrieben, bisher aber noch nicht mit Sicherheit nachgewiesen. Phylogenetische Beziehungen bestehen vielleicht zu den Bodoniden (s. dort S. 1194).

Gattung **Prowazekia** Hartmann und Chagas.

Freilebende oder halbparasitische Organismen von Bodo-artigem Habitus mit Aufnahme fester Nahrung, durch den

Digitized by Google

Besitz eines Kinetonukleus aber deutlich von echten Bodoarten unterschieden. Prowazekiaarten kommen häufig in den Fäzes des Menschen und vieler Tiere vor; meist haben sie wohl nur in Cystenform den Darm passiert, und entwickeln sich erst in den abgelegten Fäkalien, doch ist es nicht ausgeschlossen, daß sie gelegentlich auch schon im Darm in vegetativem Zustand leben. Bei der Encystierung bleiben die Geißeln meist erhalten. Prowazekia asiatica Whitmore (Fig. 42) stammt aus menschlichen Fäzes.

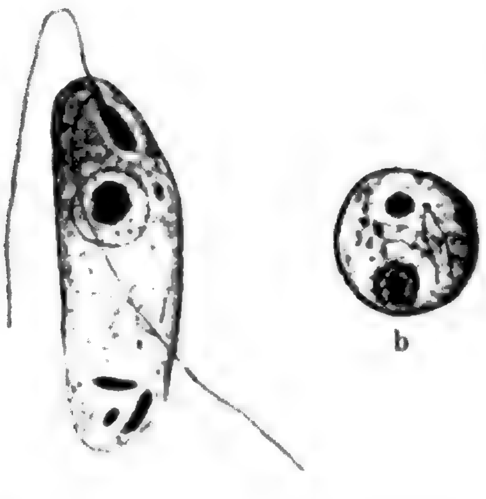


Fig. 42. Prowazekia asiatica Castellani und Chalmers. a vegetative Form, b Cyste. Nach Withmore.

Gattung **Trypanoplasma** Lav. und Mesnil.

Ebenfalls zweigeißelige Formen, wie die vorige Gattung. Doch ist die Schleppgeißel hier als undulierende Membran teilweise mit dem Körper verschmolzen und wird erst im letzten Drittel oder am Hinterende des Körpers zur freien Geißel. Die Pellicula ist ziemlich dünn und erlaubt deshalb weitgehende metabolische Bewegungen, so daß die Gestalt der Trypanoplasmen eine recht mannigfache ist. Der Kinetonukleus ist groß und stark färbbar. Trypanoplasmen sind in großer Anzahl als Blut- und Darmparasiten von Fischen beschrieben und weit verbreitet; sie kommen aber auch in zahlreichen niederen Tieren vor. Die Uebertragung der Fischtrypanoplasmen geschieht durch Fischegel, in denen auch Kopulation stattfinden soll. Doch sind diese Angaben bisher nicht bestätigt.

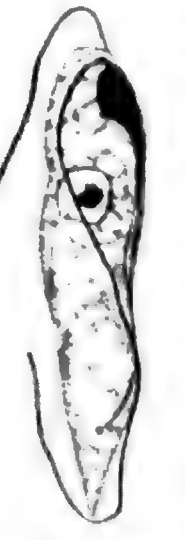


Fig. 43. Trypanoplasma helicis. Nach Jollos.

Trypanoplasma borrelli Lav. u. Mesnil im Blut von Süßwasserfischen.

Trypanoplasma intestinalis Léger. Kleine Form aus Oesophagus und Magen von Seefischen (Box salpa).

Trypanoplasma helicis Leidy (Fig. 43). Häufiger Parasit im Receptakulum der Weinbergsschnecke.

2. Familie **Trypanosomidae** Doflein.

Die Trypanosomiden haben unter ihren Vertretern eine ganze Reihe von Erregern gefürchteter Seuchen des Menschen und seiner Haustiere. Sie erfreuen sich deshalb eines weitgehenden Interesses und spielen auch in der medizinischen Literatur eine bedeutende Rolle.

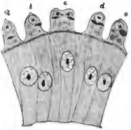
In ihren einfachsten und typischen Formen sind sie eingeißelige Flagellaten, doch macht sich schon hier die durch den Parasitismus bedingte und in der Binucleatenreihe bis zum Extrem ausgebildete Anpassung geltend, die letzten Glieder der Trypanosomenreihe sind vollkommen intrazelluläre Parasiten, die für gewöhnlich im Wirbeltierkörper überhaupt keine Geißeln mehr bilden, deren Flagellatennatur aber noch unverkennbar ist. Die Trypanosomiden sind zum größten Teil Blutparasiten warmblütiger Tiere, vielfach aber auch Darmparasiten niederer Tiere. Soweit sie Blutparasiten sind, besitzen die Trypanosomiden einen Generations- und Wirtswechsel. Kopulation und andere sexuelle Vorgänge wurden sehr häufig beschrieben, sind aber bis jetzt in keinem Falle einwandfrei nachgewiesen.

Gattung **Leptomonas** Kent em. Chatton und Allilaire.

Kleine eingeißelige Flagellaten, mit einfacher, vom Kinetonukleus ausgehender Geißel. Der Geißelkern liegt gewöhnlich im Vorderende des Tieres, kann aber seine Lage verändern und bis ins Hinterende zurückweichen. Die Geißel wird dabei mit ins Plasma zurückgezogen und es entstehen so die sogenannten „Leptotrypanosomen" oder „Trypanoidformen", deren Aussehen für die zugehörige Art charakteristisch sein soll. Außerdem kommen noch geißellose „gregarinenähnliche" Stadien vor. Die Verbreitung geschieht durch Cysten, doch ist auch „Vererbung" durch germinative Infektion (Lept. melophagia) beschrieben.

Leptomonaden werden sehr häufig im Darm von Insekten — blutsaugenden und

blutsaugenden — gefunden, aber auch
ahlreichen anderen Wirbellosen; eine
:ommt sogar in Pflanzen (L. davidi
t, in Euphorbien) vor.
ptomonas campanulata Léger.
parasit der Larven von Chironomus
osus L. Ihre „gregarinenähnlichen"
n zeigen, wie die anderer Arten auch,
lepharoplasten und den intrazellulären
der Geißel mit großer Deutlichkeit
44).



4. Leptomonas campanulata Léger.
rinenartige Stadien auf dem Darmepithel
Chironomus-Larve. e Teilungsstadium.
Nach Léger. Aus Doflein.

ptomonas jaculum Léger (Fig. 45).
Art lebt im Darm des Wasser-

15. Leptomonas
um Léger. Nach
Berliner.

Fig. 46. Herpetomonas muscae domesticae Burn. Nach Prowazek. Aus Doflein.

ions, Nepa cinerea, und ist besonadurch interessant, daß sich der Kinetous schon sehr früh teilt, auch die l des Tochtertieres schon auszuwachsen nt, lange ehe Kern und Plasma sich teilen. Dadurch macht sie nur während kurzer Zeit den Eindruck einer typischen Leptomonade. Sie bildet wohl eine Ueberleitung der Leptomonaden zur folgenden Gattung. Bei dieser Art sind auch Dauercysten bekannt.

Gattung **Herpetomonas** Kent em. Prowazek.

Aehnlich wie Leptomonas jaculum während eines Teiles ihres Lebenszyklus eine aus zwei Fibrillen zusammengesetzte Geißel hat, besitzt Herpetomonas während ihres ganzen Lebens zwei einander parallele Geißelfibrillen, die durch einen Plasmasaum verbunden sind. Auf Teilungsstadien finden sich dementsprechend 4 Geißelfibrillen.

Herpetomonas muscae domesticae Burnett em. Prow. (Fig. 46). Häufiger Parasit der Stubenfliege und einiger anderer Fliegen. Der Kinetonukleus ist mit den Basalkörnern der Geißelfibrillen durch zwei dicke Rhizoplasten verbunden. Vom Kinetonukleus nach hinten geht ein Achsenstab.

Gattung **Trypanosoma** Gruby.

Die Trypanosomen sind sämtlich Blutparasiten von Wirbeltieren und zum Teil Erreger schwerer Krankheiten. Sie besitzen einen ausgesprochenen Wirtswechsel und nehmen im Ueberträger leptomonasartige Formen an. Man darf wohl annehmen, daß sie ursprünglich Darmparasiten eben dieser Ueberträger waren, während die Wirbeltiere, in deren Blut sie leben, nur Zwischenwirte sind.

Während, wie gesagt, die Trypanosomen im Darm des Ueberträgers (und in künstlichen Kulturen) wie Leptomonaden aussehen, haben sie im Blut eine ganz andere Gestalt (Fig. 47). Der Kinetonukleus wandert

Fig. 47. Trypanosoma paddae Thiroux. a Blutform, b Kulturform. Nach Brumpt. Aus Doflein.

Fig. 48. Trypanosoma lewisi. Nach Rosenbusch.

an das Hinterende des Tieres und die Geißel durchzieht nunmehr den ganzen Körper. Während aber bei den Trypanoidformen der

Digitized by Google

Leptomonaden die Geißel im Innern des Plasmas liegen bleibt und sich bei der Bewegung der ganze Körper wellenförmig vorbiegt, tritt hier die Geißel dicht unter den Periplast und bildet so eine undulierende Membran.

Unter dem Periplast laufen bei manchen Arten nach Angabe vieler Autoren Fibrillen, sogenannte Myoneme. Vermutlich handelt es sich nur um Streifungen des Periplastes.

Die Teilung verläuft als Längs- oder multiple Teilung. Dabei teilen sich sowohl der Hauptkern als der Kinetonukleus, die beide Caryosomkerne sind mitotisch (s. Fig. 41). Vom Kinetonukleus wird die Geißel des Tochtertieres neu gebildet durch Auswachsen. Eine Spaltung der alten Geißel, wie sie von manchen Autoren angegeben wird, kommt nicht vor.

Ueber das Befruchtungsproblem bei den Trypanosomiden gibt es eine eigene, umfangreiche Literatur, doch ist ein sicherer Befruchtungsakt bisher für keine einzige Form bewiesen, wenn auch Beobachtungen vorliegen, die ihn wahrscheinlich machen. So treten vor allem im Ueberträger große plumpe Formen mit den Charakteren weiblicher Zellen (reservestoffhaltiges Plasma) und sehr schlanke mit denen männlicher Zellen (starke Geißelapparate, wenig Plasma) auf. Vielfach hat man auch aus dem Umstande, daß die Ueberträger der Trypanosomen, wenn sie an einem infizierten Tiere gesogen haben, zunächst eine nichtinfektiöse Periode durchmachen, geschlossen, daß während dieser Zeit im Ueberträger ein Sexualakt und eine besondere Entwickelung stattfinde. Nöller wies aber nach, daß im Hundefloh, der als Ueberträger des Trypanosoma lewisi ebenfalls eine nichtinfektiöse Periode hat, keine geschlechtliche Entwickelung der Trypanosomen im Darm stattfindet; die Infektion erfolgt hier auch nicht durch den Stich, sondern durch die mit den Fäces abgehenden Trypanosomen, die von der Ratte aufgeleckt werden. Die Zeit zwischen der Aufnahme und der Wiederabgabe der Trypanosomen beträgt 4 bis 5 Tage. Dagegen geschieht die Uebertragung von Trypanosoma brucei und gambiense durch den Stich der infizierten Glossinen, bei denen die Trypanosomen in die Speicheldrüse eindringen, nachdem sie zuvor im Darm eine Entwickelung (Sexualität?) durchgemacht haben.

Als Vertreter der Gattung Trypanosoma, deren einzelne Arten sich morphologisch sehr wenig unterscheiden, seien genannt:

Trypanosoma lewisi Kent (Fig. 48). Anscheinend harmloser Parasit aus dem Blute der Ratten mit spitzem Hinterende, rundem oder stabförmigem Kinetonukleus. Ueberträger ist die Rattenlaus, Haematopinus spinosus, doch kommen auch Flöhe in Betracht.

Trypanosoma brucei Plimm. u. Bradford, mit abgestutzten Hinterende und rundem Geißelkern. Morphologisch von den folgenden pathogenen Arten nicht zu unterscheiden. Der Erreger der gefürchteten Nagana oder Tsetsekrankheit, die in einigen Gegenden Afrikas die Viehbestände voll-

Fig. 49. Trypanosoma gambiense Dutton. a aus dem Blut infizierter Affen, b und c aus Glossinen. Nach Minchin. Aus Doflein.

kommen ausgerottet hat. Ueberträger sind besonders Glossina morsitans und Glossina fusca, doch kommen auch noch einige verwandte Arten in Betracht.

Trypanosoma evansi Steel. Der vorigen außerordentlich nahestehende Form, die in Asien bei Pferden und Rindern eine als Surra bekannte Krankheit erregt.

Trypanosoma equiperdum Doflein. Interessant durch seine Uebertragung, die beim Coitus (also ohne Ueberträger) stattfindet, doch kommen auch Infektionen auf anderem Wege zustande. Erreger der Dourine oder Beschälseuche der Pferde.

Trypanosoma gambiense Dutton. (Fig. 49). Dieser Parasit des Menschen erzeugt die aus Afrika schon lange bekannte Schlafkrankheit, die in der letzten Zeit, wegen ihrer außerordentlich zunehmenden Verbreitung, große Wichtigkeit erlangt hat. Ueberträger ist besonders Glossina palpalis, auch andere Arten (morsitans, fusca). Als Reservoire für die Krankheit kommen Antilopen in Betracht, die Trypanosoma gambiense, ohne schwer zu erkranken, längere Zeit im Blut haben können und die Krankheit so auch in menschenfreien Gegenden aufrecht erhalten können. Geschlechtliche Vorgänge sind, wie bei allen Trypanosomen, auch hier nicht mit Sicherheit beobachtet, trotz ausgedehnter und eifriger Untersuchungen.

Digitized by Google

Trypanosoma equinum Voges. Ausgezeichnet durch sehr kleinen punktförmigen Geißelkern. Der Erreger des Mal de Caderas oder der Kreuzlähme, der in Südamerika sehr viel Pferde erliegen. Die natürliche Infektion ist unbekannt.

Außer diesen als Menschen- und Haustierparasiten durch ihre Pathogenität wichtigen Trypanosomen sind noch aus vielen anderen Säugetieren Trypanosomen beschrieben, auch aus Vögeln, Reptilien und Fischen, denen jedoch sämtlich keine pathogene Bedeutung zukommt und die zum großen Teil noch wenig untersucht sind.

Fig. 50. Schizotrypanum cruci Chagas. a auf dem Blutkörper, b freie Blutform, c Form aus dem Darm der Wanze Conorhinus, d Form aus dem Blut des Affen Callithrix, sog. männliche Form. Nach Chagas.

Gattung Schizotrypanum Chagas.

Den ersten Schritt zur Reduktion des Bewegungsapparates und zur Ausbildung eines typischen Generationswechsels, den Charakteren der sogenannten „Hämosporidien“, tut unter den Trypanosomiden die Gattung Schizotrypanum. Aus kleinen geißel- und kinetonukleuslosen Stadien wächst dieser Parasit intraglobulär zu typischen Trypanosomen heran und erst diese verlassen dann das rote Blutkörperchen, in oder auf dem sie herangewachsen sind, um frei im Blute zu leben wie die anderen Trypanosomen (Fig. 50 a, b). Die Vermehrung findet nicht durch einfache Längsteilung statt, sondern durch Schizogonie im geißellosen Zustand, und zwar einmal durch große Schizogonien intrazellulär in Lunge, Herzmuskel und Gehirn, wobei stets deutlich ein Kinetonukleus zu sehen ist (Fig. 51); dann durch kleine kuglige Schizogonien unter Bildung von 8 Merozoiten in Lungenkapillaren. Im letzteren Fall wird entweder der Kinetonukleus zum Beginn der Abkugelung eliminiert und die Teilsprößlinge besitzen dann nur einen Kern, oder der Kinetonukleus bleibt erhalten und die Teilsprößlinge besitzen je 2 Kerne. Vielleicht sind das Anzeichen eines sexuellen Dimorphismus. Auf jeden Fall haben wir hier ein typisches Trypanosoma, das in seinen intrazellulären Stadien keine Geißel besitzt, zum Teil sogar auf diesen Stadien den Kinetonukleus eingebüßt hat. Im Darm des Ueberträgers erscheint es (wahrscheinlich nach Kopulation) als typisches chrithidiaartiges Flagellat, das sich durch Längsteilung vermehrt (Fig. 50 c).

Fig. 51. Schizotrypanum cruci Chagas. Multiple Vermehrung in einer Endothelzelle der Lunge. Nach Hartmann.

Fig. 52. Schizotrypanum cruci Chagas. Schizogonie ohne Geißelkern aus Lungenkapillaren. Nach Chagas.

Schizotrypanum cruci Chagas. Ein menschlicher Parasit, der in Brasilien eine schwere Krankheit, besonders bei Kindern, erzeugt. Der Ueberträger ist eine Wanze, Conorhinus megistus Burm. Künstliche Infektion ist bei mehreren Laboratoriumstieren gelungen.

Gattung Leishmania R. Ross.

Endgültig an Zellparasitismus angepaßt haben sich die Leihsmanien. Sie kommen im ganzen Körper ihres Wirtes nicht mehr frei vor, sondern liegen als länglich-ovale Gebilde, mit deutlichem Geißelkern, in Leukocyten und Endothelien der Milz und im Knochenmark; im peripheren Blut finden sie sich nur selten. In künstlichen Kulturen, die leicht gelingen — auch im Darm des Ueberträgers —, verwandeln sie sich aber in typische Flagellaten vom Leptomonastyp und vermehren sich durch Längsteilung (Fig. 53).

Leishmania donovani Lav. u. Mesn. Der Parasit kommt in fast allen Organen des Menschen vor, bei dem er eine schwere, sehr oft tödliche, Krankheit verursacht, die man mit dem Namen Kala-Azar bezeichnet. Die Uebertragung auf Tiere ist nicht gelungen. Die Uebertragung von Mensch zu Mensch soll durch Wanzen, Cimex rotundatus

Digitized by Google

nach Patton, Conorhinus rubrofasciatus nach Donovan, geschehen. Asien, Aegypten usw.

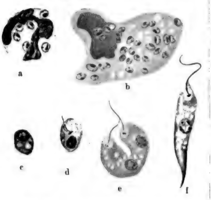


Fig. 53. Leishmania donovani Laveran und Mesnil. Original.

Leishmania tropica Wright. Morphologisch gleicht diese Art, ebenso wie die folgende der vorigen. Sie ist gleichfalls ein Parasit des Menschen, doch hat sie ihren Sitz vor allem unter der Haut, wo sie große Beulen („Orientbeule, Aleppobeule") erzeugt. Der Ueberträger ist nicht mit Sicherheit bekannt. Die Infektion mit Kulturen gelingt leicht bei Affen und Hunden. Die Krankheit ist im ganzen Orient, in Afrika und Brasilien verbreitet.

Leishmania infantum Nicolle. Im Mittelmeergebiet weit verbreitete Krankheit von der Art der Kala-Azar. Doch befällt dieselbe fast nur Kinder unter 6 Jahren. Auf Affe und Hund ist sie leicht übertragbar, auch kommen spontan infizierte Hunde nicht selten vor. Die künstliche Kultur gelingt leicht. Uebertragung durch Flöhe ist festgestellt.

3. Familie Piroplasmidae.

Die Piroplasmiden sind geißellose Parasiten der roten Blutkörperchen, ausschließlich bei Säugetieren. Pigment bilden sie nie aus. Ihre Zugehörigkeit zu den Binucleaten zeigen sie durch das Vorhandensein eines Kinetonukleus, der sich bei vielen Formen findet, und das gelegentliche Auftreten von Geißelstadien (Fig. 55). Die Uebertragung findet durch Zecken statt.

Gattung **Babesia** Starcovici (syn. Piroplasma und Pirosoma).

Die Babesien, Erreger wichtiger Tierseuchen, machen ihre ganze Entwickelung im Säugetier in oder auf roten Blutzellen ihrer Wirte durch. Doch ist dieselbe noch nicht ganz geklärt und die Ansichten der einzelnen Autoren gehen beträchtlich auseinander. Am charakteristischsten ist ihre birnförmige Gestalt, die etwa geißellosen Leptomonaden gleicht. Die Birnformen vermehren sich auch durch fortgesetzte Längsteilung nach Art von Flagellaten. Daneben kommen auch amöboide, runde, ringförmige Formen vor, die als verschiedene Stadien der Entwickelung gedeutet werden (Fig. 54). Manche Formen, die von

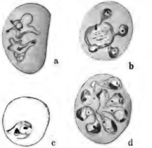


Fig. 54. Babesia canis Starc. Formen aus dem Blut. Nach Kinoshita.

Bettencourt, Franca und Borges in der Gattung Theileria vereinigt wurden, haben im Gegensatz dazu bazillenförmige Gestalt und bilden bei der Vermehrung Kreuzformen. Es ist jedoch besser den Gattungsnamen Theileria für Formen mit abweichender Entwickelung zu reservieren (s. unten); denn ein großer Teil der stabförmigen Parasiten erweist sich durch seine Entwickelung als typische Babesien.

Fig. 55. Babesia canis. Flagellatenform. Nach Breinl und Hindle.

Ueber die Entwickelung in den Zecken herrscht noch mehr Unklarheit als über die Entwickelung im Säugetier, doch sind Kopulationsstadien, wurmförmige Ookineten und multiple Vermehrungsformen beobachtet; auch die Unterscheidung der einzelnen Arten ist unsicher.

Digitized by Google

Babesia canis Piana und Galli-Valerio. Diese Form, die am genauesten untersucht ist, zeigt deutlich das Vorhandensein des Geißelkernes. Nur bei ihr sind auch bisher im Herzblut, das mit Natrium citrinum versetzt war, Flagellatenstadien gesehen worden (Fig. 55).

Babesia bigemina Smith und Kilborne. Ein sehr verbreiteter Parasit, der das Blutharnen der Rinder verursacht. Die Krankheit wird nicht durch die infizierte Zecke übertragen, sondern durch deren Nachkommenschaft, indem die Eier durch die Ookineten infiziert werden.

Babesia mutans Theiler. Eine der bazillenförmigen Babesien (Theileria), die sich aber außer durch ihre Gestalt durch nichts von den anderen Babesien unterscheidet. Sie kommt häufig in Mischinfektionen vor. Bisher nur in Afrika gefunden.

Gattung **Theileria** Bettenc., Franca und Borges.

Babesienähnliche Organismen, die besonders den bazilliformen Babesien äußerst ähneln, sich von ihnen aber durch eine ganz andere Entwickelung scharf unterscheiden. Die Entwickelung findet nicht wie bei Babesia durch Längs- oder Knospungs-

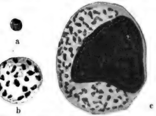


Fig. 56. Theileria parva Theiler. Schizogonie. Nach Gonder. Aus Doflein.

Fig. 57. Theileria parva Theiler. Gametocyten im Blut. Nach Gonder. Aus Doflein.

teilung in Erythrocyten statt, sondern durch Schizogonie in inneren Organen. Im Blut erscheinen allein die Gameten. Theileria ist daher auch nicht durch Blutinjektion übertragbar wie die Babesien.

Theileria parva Theiler. Theileria parva vermehrt sich in Milz und Lymphdrüsen der infizierten Tiere unter Bildung großer Schizogonien (Fig. 56). Die letzte morphologisch abweichende Schizogonie führt zur Ausbildung von Makro- und Mikrogametocyten, die dann ins Blut gelangen und die Erythrocyten befallen, wo sie heranwachsen (Fig. 57). Im Darm der Zecke findet dann Reifung und Kopulation statt und anschließend daran eine Sporogonie, die zahl-

Fig. 58. Theileria parva Theiler. Entwickelung in der Zecke. A Mikrogamet, B Makrogamet, C bis D Kopulation, E Ookinet, F Vermehrung (Sporogonie). Nach Gonder. Aus Doflein.

reiche ganz kleine Keime liefert, welche die Neuinfektion verursachen (Fig. 58). Theileria parva ist der Erreger des Küstenfiebers. Morphologisch sind die Gameten von Theileria parva von den Parasiten der Babesia mutans nicht oder doch nicht sicher zu unterscheiden, wohl jedoch durch die abweichende Entwickelung, die durch die Eigenart ihrer Entwickelung bedingte Unmöglichkeit, durch Blutinjektion übertragen zu werden, den Umstand, daß sie nie, wie die Babesien, auf die Nachkommen der infizierten Zecken „vererbt" wird und daß sie eine absolute Immunität bei Rindern, die die Krankheit überstanden, hinterläßt.

4. Familie **Halterididae** Hartmann und Jollos.

Ein weiteres Bindeglied zwischen den Trypanosomiden und den Plasmodien, den beiden Extremen der Binucleatenreihe, stellen die „Halteridien" dar. Nach Schaudinns stark angezweifelten, aber in ihren wichtigsten Punkten bestätigten Untersuchungen kommen im Leben dieser Parasiten freie Trypanosomenstadien und unbewegliche endoglobuläre Stadien vor, die aber meist noch einen Geißelkern besitzen. Letztere sind die charakteristischen Geschlechtsformen im Vogelblut, die durch ihre Hantelform den Parasiten ihren Namen gegeben haben (Fig. 59). Dieselben sind extrem sexuell differenziert in reservestoffreiche Makrogametocyten(♀) und mit hinfälligem Plasma versehene Mikrogametocyten. Beide bilden Pigment. Im Darm der Ueberträger findet die Reifung und Befruchtung statt. Die Makrogametocyten werden durch zwei Reduktionsteilungen, wobei die Reduktionskerne im Plasma resorbiert werden, zu reifen Makro-

Digitized by Google

gameten, die Mikrogametocyten zerfallen nach Kernteilung in 8 Mikrogameten, die den Bau von feinen Trypanosomen mit langgestrecktem Hauptkern, Kinetonukleus widerlegt, da er angibt, die Ausbildung des Geißelapparates im Leben verfolgt zu haben. In künstlichen Kulturen kann man, wie dies von mehreren Autoren gezeigt wurde, aus

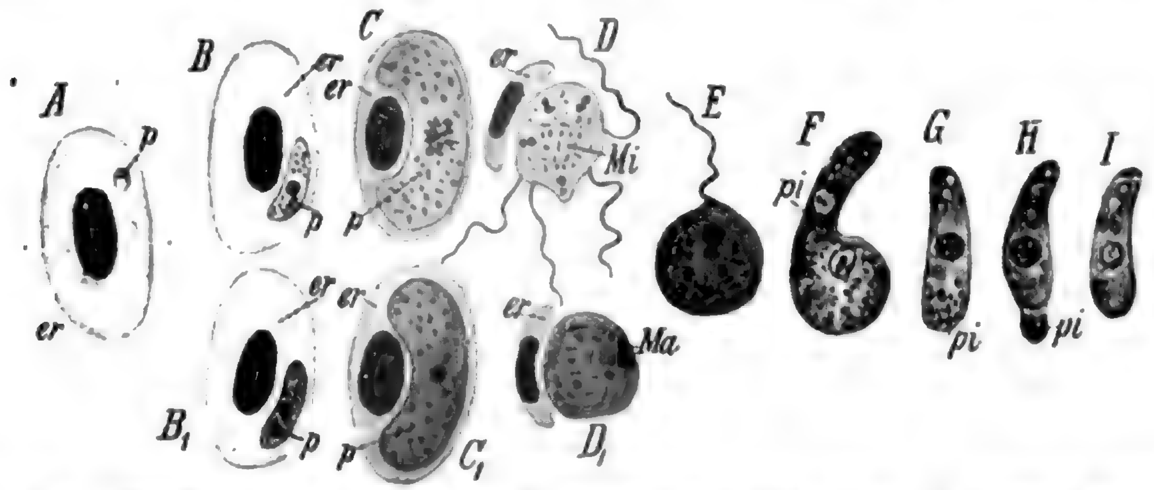


Fig. 59. Geschlechtliche Generation von Haemoproteus columbae. A junger Gametocyt in Erythrocyten, B, C Heranwachsen des Mikrogametocyten, D dessen Reifung (Bildung der Mikrogameten), B_1, C_1, D_1 die entsprechenden Stadien des Makrogametocyten, E Kopulation, F bis J Ookinetenbildung. Nach Aragâo. Aus Doflein.

und Saumgeißel aufweisen. Je ein Mikrogamet dringt in einen Makrogameten ein und unter Verschmelzung der Gametenkerne wandelt sich die kugelige Zygote in ein wurmförmiges Stadium, den sogenannten Ookineten, der ein Teil des Plasmas mit den Reduktionskernen und dem Pigment abschnürt (Fig. 59).

Die Ookineten wandeln sich nun bei der Gattung Halteridium nach Schaudinn (von Mayer experimentell bestätigt) in trypanosomenartige Flagellaten (siehe Artikel „Protozoa" Fig. 12), vermehren sich hier durch Längsteilung und können nach längerer nicht infektiöser Periode — auf das Verhalten der Parasiten während derselben kann hier nicht eingegangen werden — frische Vögel infizieren. Bei der Gattung Haemoproteus soll die Umwandlung der Ookineten in Flagellaten fehlen und die Neuinfektion direkt durch die Ookineten vor sich gehen (Aragâo).

Auch durch ihre ungeschlechtliche Vermehrung im Vogelkörper sollen sich die beiden Gattungen erheblich verschieden verhalten (s. unten).

Gattung **Halteridium** Labbé (?).

Unter diesem Namen wären die Glieder der Familie zu vereinigen, die in ihrem Entwickelungskreis Flagellatenformen aufweisen. Die Entwickelung der Trypanosomenform aus der unbeweglichen Form ist seit Schaudinn nicht wieder beobachtet worden, doch sind seine Angaben mit der Behauptung, er sei durch Mischinfektion von Halteridium und Trypanosoma getäuscht worden, nicht

Halteridien leicht und mühelos Flagellatenformen erhalten; auch im Darm von Mücken sind diese Formen öfters beobachtet worden. Ueber die ungeschlechtliche Vermehrung im Vogelkörper ist nichts Sicheres bekannt.

Halteridium noctuae Celli und Sanfelice ist die Art, auf die sich Schaudinns Angaben beziehen. Die oben beschriebene Befruchtung und Weiterentwickelung in Flagellaten findet nach Schaudinn in Culexarten statt.

Halteridium syrnii Mayer. Dieses Halteridium zeichnet sich nach Mayer dadurch aus, daß bereits die ganz jungen, noch pigmentfreien Formen einen Kinetonukleus besitzen. Mayer, der sich auf experimentelle Untersuchungen beschränkte, gelang es, aus ganz geringen Blutmengen, die er vorher mikroskopisch auf das Fehlen von Trypanosomen genau untersucht hatte, Flagellaten sowohl auf Blutagar als auch direkt unter dem Deckglas zu züchten und so die Zugehörigkeit der Trypanosomenformen zur Entwickelung des Halteridiums zu beweisen. Auch im Darm von Culex annulatus und Stegomyia calopus konnte er Ookineten und Flagellatenformen beobachten. Doch ist es zweifelhaft, ob die Mücken überhaupt als natürliche Ueberträger in Frage kommen, da eine Infektion durch Mücken seither nicht erzielt werden konnte.

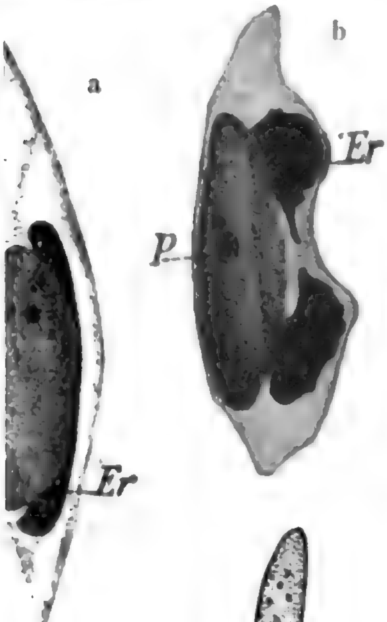
Gattung **Haemoproteus** Kruse.

Im Gegensatze zu Halteridium soll es hier auf keinem Entwickelungsstadium (mit Ausnahme der Mikrogameten) zur Aus-

Digitized by Google

ng von Schwärmstadien kommen. Die ehrung findet durch große typische ogonien in Leukocyten oder Endothelien und zwar ausnahmslos im Vogel, end im Ueberträger einzig und allein Kopulation und Ookinetenbildung vor gehen soll. Die Schizogonie erinnert ie der Theilerien sowie auch an die Schizotrypanum und Leishmania ig. 51 u. 53), wodurch die phylogene- Entwickelung derselben klar zutage

aemoproteus columbae Celli und elice. Die Stadien im peripheren der Tauben stimmen mit den analogen en von Halteridium ganz überein. Befruchtung findet im Darm des Ueber- rs (Lynchien) statt und gleicht eben- vollkommen der Halteridienbefruch- Damit soll jedoch die Entwickelung eberträger abgeschlossen sein und der et soll nach Abstoßung seines Pig- es durch den Stich des Lynchia wieder Blutbahn der Taube gelangen. Etwa ge nach dem Stich kommt es in mono- ären Leukocyten (oder Endothelien), ch an der Wand eines Lungengefäßes heftet haben, zu Schizogonien, die n stark hypertrophischen Leukocyten- bis 60 μ große Cysten mit Merozoiten en. Durch Platzen der Cysten findet eine Ueberschwemmung des Blutes iesen kleinen Formen statt, die sich in



). Leucocy- ı ziemanni. ocyten. P Pa- Er Kern der lle. Nach Lühe.

Erythrocyten festsetzen und dort wieder zu Gameten heranwachsen. In den Cysten sollen sich schon Andeutungen einer späteren Geschlechtsdifferenzierung finden.

5. Familie Leucocytozoidae Hartmann und Jollos.

Diese Familie, bei der nach Angaben Schaudinns gleichfalls ein Wechsel zwischen Flagellatenstadien und sogenannten Sporozoenformen vorkommt, ist vor allem durch ihre Geschlechtsgeneration gekennzeichnet, die im Gegensatz zu den Halteridien nicht in Erythrocyten, sondern in kernhaltigen Erythroblasten sich findet, die meist eine merkwürdige spindelförmige Gestalt aufweisen, doch gibt es auch runde Wirtszellen. Den Geschlechtsformen fehlt hier auch das Pigment (Fig. 60). Sonst ist die Organisation derselben sowie die Befruchtung die gleiche, nur bilden die Mikrogametocyten eine größere Zahl (16) von Mikrogameten. Der Ookinet wandelt sich aber (im Darm von Culex) nicht wie bei Halteridium direkt in ein Flagellatum, sondern wächst unter starker Kernvermehrung zu einem vielfach gewundenen Schlauch heran und bildet unter Zurücklassung eines großen Restkörpers zahlreiche kleine sehr schlanke Trypanosomen (Fig. 61). Diese metagame multiple Vermehrung kann als Sporogonie bezeichnet werden. Nachdem diese Flagellaten die Darmwand durchbohrt haben, gelangen sie beim Stechakt wieder ins Blut des Vogels. Schaudinns Annahme über den Wechsel von Trypanosomenformen mit geißellosen und seine Erklärung der spindelförmigen Geschlechtsstadien als geißellose Trypanosomenform, die die Erythroblasten in sich aufgenommen haben, besteht wohl nicht zu Recht, desgleichen seine Angaben über die Vermehrung im Vogelkörper. Doch ist letztere bisher nicht aufgeklärt und es liegt nur eine kurze, noch unbestätigte Angabe von Fantham über Schizogonie bei Leucocytozoon lovati vor.

Auch die angeführten Beobachtungen Schaudinns über die Entwickelung in

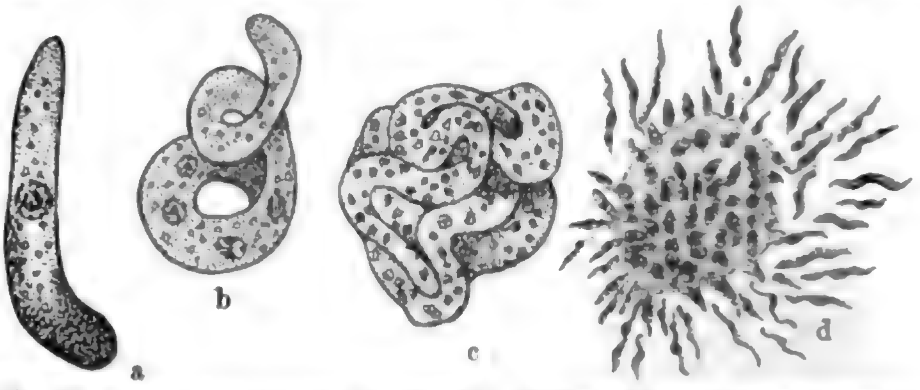


Fig. 61. Leucocytozoon ziemanni. Ookinet (a) mit darauffolgender Sporogonie im Darm von Culex. Nach Schaudinn. Aus Doflein.

Digitized by Google

der Mücke sind bisher nicht bestätigt. Es wurde zwar vielfach das Vorkommen eines Kinetonukleus angegeben, auch Züchtung von Flagellaten aus Leucocytozoonblut, ver-

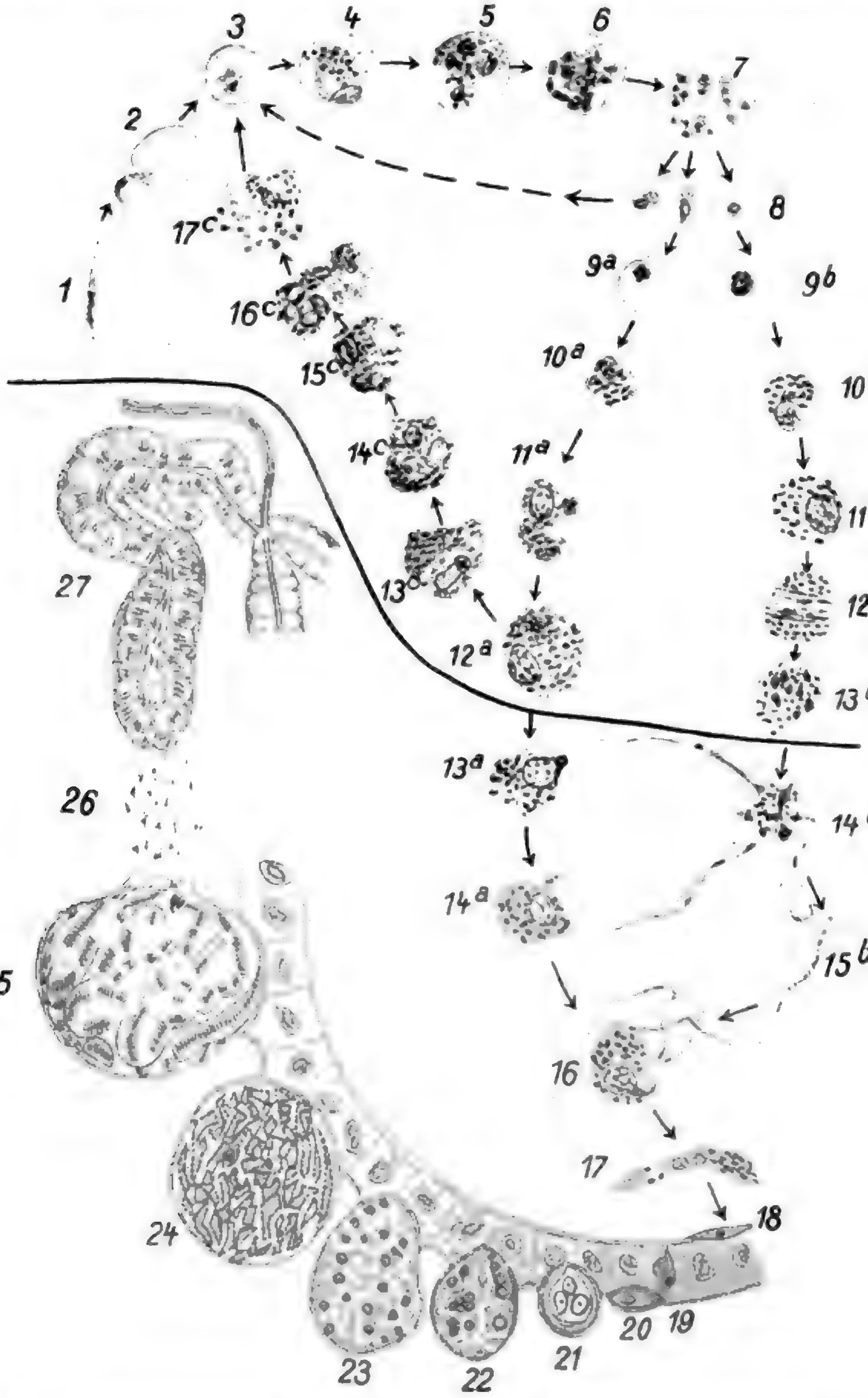


Fig. 62. Entwickelungskreis von Plasmodium vivax. Nähere Erklärung im Text. Aus Hartmann.

Digitized by Google

schiedene Untersucher vertreten aber die Ansicht, daß der „Kinetonukleus" ein aus dem Kern ausgestoßenes Carysom sei (Woodcook) und die Züchtungsversuche sind ebenfalls nicht beweisend, da in diesen Fällen eine Mischinfektion nicht mit genügender Sicherheit ausgeschlossen war. Von Reichenow und Woodcook wird neuerdings die Hämogregarinennatur der Leucocytozoen vertreten; vorderhand scheint uns aber ihre Zugehörigkeit zu den Binucleaten nicht widerlegt.

Leucocytozoon ziemanni Laveran. Parasit aus dem Blut von Raubvögeln. Die oben wiedergegebenen Beobachtungen Schaudinns beziehen sich auf diese Art.

6. Familie **Plasmodiidae.**

Die letzte Stufe in der geschilderten Entwickelungsreihe der Binucleaten haben die Plasmodiden erreicht. Bei ihnen kommen in der Regel, mit Ausnahme der Mikrogameten und gelegentlich der Merozoiten bei Proteosoma, keine Flagellatenstadien mehr vor und auch der Geißelkern findet sich nur vereinzelt. Dagegen ist der Generations- und Wirtswechsel bei ihnen am augenfälligsten. Ihre Entwickelung gliedert sich in drei Abschnitte, 1. die ungeschlechtliche Entwickelung in Form von Schizogonie innerhalb der Erythrocyten der Wirbeltiere, 2. Ausbildung der Geschlechtsformen daselbst und deren Kopulation im Darm des Ueberträgers (Culex und Anophelesarten) und 3. die ungeschlechtliche Vermehrung im Ueberträger durch Sporogonie (Fig. 62). Bei den Schizogonie- und Geschlechtsformen findet die Bildung von Pigment statt, das durch Umwandlung des verdauten Hämoglobins entsteht. Die Schizogonie ähnelt der kleinen Schizogonieform von Schizotrypanum (Fig. 62, 1—7), die Ausbildung der Geschlechtsformen und die Befruchtung vollzieht sich in derselben Weise wie bei den Halteridien und Leucocytozoen (Fig. 62, 8—17). Die Ookineten wandern hier aber durch die Darmwand und kugeln sich innerhalb der Tunica elastico-muscularis ab, wobei letztere durch das starke Wachstum des Parasiten sehr hervorgewölbt wird und das Aussehen einer Cyste erlangt (Oocyste) (Fig. 62, 21—25). Das Wachstum des Parasiten geschieht in der Längsrichtung; er knäuelt sich unter gleichzeitiger Kernvermehrung auf, ähnlich wie der Ookinet von Leucocytozoon im Darm, und erscheint daher auf Schnitten in einzelne kernhaltige Plasmaelemente zerlegt. Nach einer weiteren Vermehrung der Kerne zerfallen die Plasmamassen unter Zurücklassung eines Restkörpers in eine große Anzahl von Sporozoiten. Durch Bersten der sogenannten Oocyste gelangen sie in die Leibeshöhle der Mücke und sammeln sich später in den Speicheldrüsen an (Fig. 62, 27). Durch den Stich der Mücke werden sie mit dem Sekret der Speicheldrüse in das Blut übergeimpft. Diese Sporogonie vollzieht sich unter günstigen Entwickelungsbedingungen (Temperatur usw.) in 8 bis 9 Tagen.

Gattung **Proteosoma** Labbé.

Vogelparasiten, die außer bei den Mikrogameten noch gelegentlich bei den Merozoiten Geißeln entwickeln. Doch ist auf fast allen Stadien ein Kinetonukleus vorhanden (Fig. 63). Neuerdings wird die Vereinigung von Proteosoma mit der nächsten Gattung wieder mehr befürwortet. Als Ueberträger fungieren nur Arten der Gattung Culex.

Fig. 63. Proteosoma praecox Grassi und Fel. a junger Agamet mit Geißel. b Makrogametocyt mit Kern und Blepharoplast, c Mikrogamet mit Kern, Blepharoplast und undulierender Membran. Nach Hartmann.

Proteosoma praecox Grassi und Feletti aus Sperlingsvögeln.

Gattung **Plasmodium** Marchiafava und Celli.

Die Plasmodien, die Erreger der menschlichen Malaria, sind mit den Parasiten der Vogelmalaria eng verwandt. Begeißelte Merozoiten kommen nicht mehr vor, doch findet man häufig noch 2 Kerne. Es werden 3 Formen der menschlichen Malaria (Tertiana, Quartana und Tropica) unterschieden, deren Erreger man als drei verschiedene Arten betrachtet. Die Uebertragung geschieht nur durch Arten der Gattung Anopheles. Jedesmal mit dem Zerfall der Schizonten tritt ein Fieberanfall beim erkrankten Menschen ein.

Plasmodium praecox Grassi und Feletti — Tropicaparasit. Von den drei menschlichen Malariaparasiten ist diese Form die kleinste, zugleich ist das Krankheitsbild hier das schwerste. Im Blut findet man den Parasiten gewöhnlich als ringförmiges Gebilde mit einer großen Vakuole im Innern. Die Dauer der schizogonischen Entwicke-

Digitized by Google

lung beträgt 48 h, so daß alle 2 Tage sich ein Fieberanfall wiederholt. Die Gametocyten, die hauptsächlich im Blute des Knochenmarks entstehen, besitzen hier sehr charakteristische halbmondförmige Gestalt. Zur Entwickelung in der Anopheles, die im Temperaturoptimum (28 bis 30° C) etwa 8 Tage beansprucht, ist eine Mindesttemperatur von 18° C nötig.

Plasmodium vivax Grassi und Feletti — Tertianaparasit (Fig. 62). Dieser Parasit ist ausgezeichnet durch die starke amöboide Beweglichkeit der jungen Formen und seine bedeutendere Größe. Während der Tropicaschizont im erwachsenen Zustand das Blutkörperchen nicht ausfüllt, wird der Tertianaparasit größer als sein Blutkörperchen und bläht dieses auf. Das Blutkörperchen nimmt dabei die sogenannte Schüffnersche Tüpfelung an. Die Gametocyten sind rund, nicht halbmondförmig wie beim Tropicaparasiten. Die Makrogametocyten werden dabei sehr groß, während die Mikrogameten etwas kleiner bleiben. Die Sporogonie ist die gleiche wie bei Plasmodium praecox. Das Temperaturoptimum beträgt auch hier 28 bis 30° C, das Minimum 16° C.

Plasmodium malariae Laveran — Quartanaparasit. Gegenüber dem Tertianaparasit bestehen nur geringfügige Unterschiede bei der Entwickelung des Parasiten; doch dauert die Entwickelung der Schizonten 72 Stunden, weshalb hier nur jeden 4. Tag ein Fieberanfall auftritt. Die Entwickelung im Ueberträger ist nicht genau bekannt; sie geht bei einer Temperatur von mindestens 14 bis 16,5° und nicht höher als 30° (?) vor sich.

4. Ordnung **Hypermastigina** Grassi.

Als Hypermastiginen bezeichnen wir mit Grassi eine Gruppe von großen parasitischen Protozoen, die man bisher meist Trichonymphiden nannte und deren systematische Stellung vielfach umstritten wurde, da sie einerseits den Flagellaten, andererseits den Ciliaten angereiht wurden. Die kompliziertesten unter diesen Formen sind total bewimpert wie die Ciliaten. Da sie jedoch in ihrer Entwickelung nach Hartmann sich wesentlich von diesen verschieden verhalten, hat derselbe eine besondere Klasse für sie in Anspruch genommen. Die inzwischen genauer studierten und bekannt gewordenen einfachen Formen (Lophomonas, Calonympha) schließen sich jedoch ganz an Flagellaten (Trichomonaden) an und deshalb erscheint die früher schon von Grassi vertretene Flagellatennatur der Trichonymphiden wenigstens für die meisten Formen gerechtfertigt. Ob allerdings auch die totalbewimperten Gattungen (Trichonympha usw.) hierher gehören, ist gegenwärtig noch nicht zu entscheiden. Wenn somit auch die Berechtigung der Ordnung Hypermastigina und ihrer Einreihung bei Euflagellaten nach den neuen Untersuchungen von Grassi und seinen Mitarbeitern vollkommen erwiesen ist, so kann doch der Umfang und die Begrenzung der Ordnung nur als provisorische gelten.

Alle hierher gestellten Formen stellen sich durch die Zahl ihrer Geißeln wie ihre sonstige Organisation (Kern, Achsenstab usw.) als die extremste und höchste Entwickelungsstufe der Flagellaten dar. Die einfacheren Formen haben am Vorderende ein Büschel von langen Geißeln, die von einer Reihe oder Platte von Basalkörperchen entspringen, die über dem Kerne liegt. An den Enden dieser Basalkörperchenreihe liegen zwei Zentriole, die die Kernspindel bei der Teilung liefern, während der Kern die Chromosomen stellt (ähnlich wie bei Trichomonaden). Der Kern liegt in einer Art Kelch, der aus dem obersten auseinander gewichenen Teile eines aus mehreren Fibrillen sich zusammensetzenden Achsenstabes besteht. Neben dem Kern liegt häufig noch ein chromatisch sich färbender Körper, der von Janicki als Parabasalkörper bezeichnet wird und der vermutlich einen Reservestoff darstellt. Derselbe wird bei der Teilung entweder mit geteilt oder in dem einen Tochtertier neu gebildet. Neben diesen einfachen Formen mit offenbar monoenergiden Kernen gibt es nun vielkernige Formen, bei denen jedem einzelnen Kern ein besonderes Basalkorn entspricht, von welchem 4 lange Geißeln entspringen, während nach innen ein Achsenfaden davon ausgeht, der sich mit den übrigen zu dem zentral verlaufenden Achsenstrang vereinigt. Eine letzte Gruppe bilden die total bewimperten Formen, die wohl in ihrer ganzen Organisation eine gewisse Aehnlichkeit mit den vielkernigen Formen aufweisen, jedoch einen einzigen großen Kern besitzen, der nach Hartmann polyenergid ist und also der Gesamtheit der einzelnen Kerne bei den vielkernigen Formen entspräche.

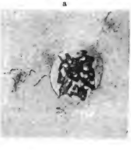
Von Fortpflanzungserscheinungen ist bei den einfacheren Formen hauptsächlich Längsteilung im freien Zustand beobachtet, doch ist auch mehrfache Teilung, sowie Zwei- und Mehrfachteilung innerhalb von Cysten beschrieben.

Bei einer total bewimperten Form hat Hartmann ferner eine multiple Knospung beschrieben. Hierbei entstehen die Tochterkerne in der Weise, daß aus dem polyenergiden Primärkern Chromatinelemente (Einzelkerne) heraustreten (eine Chromidienbildung vortäuschend) und sich innerhalb des Protoplasmas mitotisch weitervermehren. Ein großer Rest des Primärkernes geht mit einem Teil des Plasmas als Restkörper zu-

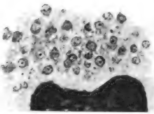
Digitized by Google

unde (Fig. 64). Da innerhalb desselben
irtes die erwachsenen Parasiten in zwei
rschiedenen Formen auftreten, ist Hartann geneigt, dieselben als männliche und

a



b



c

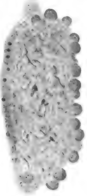


Fig. 64. Trichonympha Holomastigotoides hertwigi Hartmann. a Auswandern der Sekundärkerne (Chromosomen) aus dem Primärkern, b Vermehrung der Sekundärkerne im
sma. c multiple Knospung (Gametenbildung?). Nach Hartmann.

ibliche Formen derselben Art aufzufassen
d die multiple Teilung, die zudem nur in
ıwärmenden Geschlechtstieren der Terten beobachtet wurde, als Gametenbildung
zusprechen. Grassi dagegen hält die
rschiedenen Formen für verschiedene Arten.
e Entscheidung in dieser Frage muß weien Untersuchungen vorbehalten bleiben.
e Hypermastiginen sind fast durchwegs
rmparasiten von Termiten und nehmen
ormte Nahrung aus dem Darm der
rtstiere (Holzstückchen) auf.

Bei der großen Verschiedenheit der hier
: gehörigen Gattungen erscheint es an
bracht, gewisse zu besonderen Familien
ammenzufassen. So wollen wir zunächst
Familien unterscheiden:

1. Lophomonadidae einfachere, monorgide Formen.
2. Calonymphidae, vielkernige Formen.
3. Trychonymphidae, Formen mit
hr oder minder totaler Bewimperung und
venergidem Kern.

Die Zahl der Familien wird zukünftig vorsichtlich noch vermehrt werden müssen.

1. Familie **Lophomonadidae** Grassi.

Hierher stellen wir Formen mit sicher monoenergidem Kern und einem Busch langer Geißeln am Vorderende.

Gattung **Lophomonas** Stein.

Lophomonas blattarum (Fig. 65) ist ein Parasit aus dem Enddarm der Küchenschabe (Periplaneta orientalis). Es ist die kleinste der bekannten Hypermastiginen (ca. 30 μ). Sie besitzt einen meist beutelförmigen, schwach metabolischen Körper. Am Vorderende sitzt ein Busch von langen Geißeln, die nach den Seiten zu etwas kürzer werden. Sie entspringen aus einer Reihe von Basalkörperchen, an deren Enden die Teilungszentren liegen. Darunter befindet sich der Kern in einer kelchartigen Erweiterung des nach dem Hinterende hinziehenden Achsenstabes. Um den Kelch befindet sich eine besondere Partie oft strahlig angeordneten Plas-

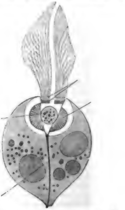


Fig. 65. Lophomonas blattarum Stein.

Digitized by Google

mas, die von Janicki mit dem Parabasalapparat anderer Formen homologisiert wird(?). Die Aufnahme fester Nahrungselemente aus dem Darminhalt des Wirtes geschieht an der ganzen Oberfläche mit Ausnahme des Vorderendes. Von Fortpflanzungsvorgängen kommt ein- und mehrfache Teilung im freibeweglichen Zustand vor. Außerdem sind Cysten mit 2 bis zu 14 Kernen beobachtet worden.

Gattung **Joenia** Grassi.

Joenia annectens (Fig. 66) aus dem Enddarm der Termite Callotermes flavi-

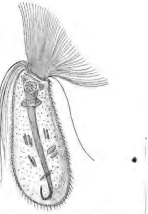


Fig. 66. Ioenia annectens Grassi. Nach Bütschli. Aus Doflein.

collis hat eine beutelförmige Gestalt und ist im Gegensatz zu der vorigen Gattung nicht metabol. Die deutliche Pellicula ist gleichmäßig mit feinen unbeweglichen Borsten besetzt. An dem schief abgestutzten Vorderende sitzt ein Büschel langer beweglicher Geißeln. Darunter liegt der Kern ebenfalls in einer Art Kelch, der von dem oberen Teil des hier viel komplizierter gebauten Achsenstabes gebildet wird. Ueberhaupt ist das ganze Vorderende (Kern, Basalkörper, Parabasalapparat [?]) hier viel komplizierter organisiert, doch sind die Verhältnisse noch nicht ganz geklärt. Die Teilung vollzieht sich ähnlich wie bei der vorigen Art.

Gattung **Devescovina** Foà.

Ob die ähnlich wie Trichomastix nur mit 4 Geißeln (3 Vorder- und 1 Schleppgeißel) ausgestattete Devescovina striata (Fig. 67) in diese Familie einzureihen ist, erscheint fraglich. Es ist sicher die einfachste aller bisher bekannten Hypermastiginen, die infolge der großen Aehnlichkeit ihrer Organisation mit Trichomonaden vielleicht besser dort anzuschließen wäre.

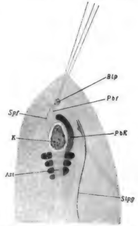


Fig. 67. Devescovina striata Foa var. hawaiensis Janicki. Nach Janicki. Aus Doflein. Nach Köhler.

Doch ähnelt sie andererseits sehr den Einzelelementen der folgenden Familie. Es wird wohl dafür eine besondere Familie nötig sein (Grassi). Auffallend ist die außerordentlich starke Ausbildung des Parabasalapparates bei dieser Gattung, der nach Janicki bei der Teilung mitgeteilt wird.

2. Familie **Calonymphidae** Grassi.

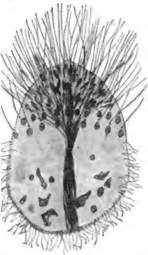
Diese Familie umfaßt Formen, die stets viele Kerne aufweisen, die in parallelen Kränzen in der vorderen Partie des Tieres angeordnet sind. Zu jedem Kern gehört je ein Basalkorn (zugleich Teilungszentrum), von welchem einerseits 4 Geißeln ausgehen, andererseits eine Achsenfibrille, die sich alle zusammen zu einem Achsenstab vereinigen. Dazu kommt noch zu jedem Kern ein Parabasalkörper.

Gattung **Calonympha** Foà.

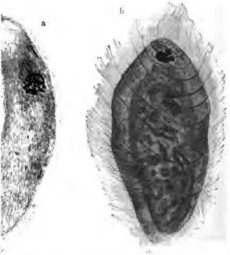
Bei Calonympha grassii (Fig. 68) haben nur die mehr rückwärts liegenden Kränze von Geißelapparaten einen Kern (Caryomastigonten nach Janicki), während

Digitized by Google

rderen nur aus Geißelapparat und Para-
:örper bestehen (Acaryomastigonten).



ǃ. Calonympha grassii Foà. Nach Foà. Aus Hartmann.



. Holomastigotoides hertwigi Hartmann. a männ- iches, b weibliches Individuum. Nach Hartmann.

3. Familie **Trichonymphidae** Kent.

Hierher stellen wir Formen, deren Körper ganz oder zum großen Teil mit Wimpern oder Geißeln besetzt ist und die einen großen nach Hartmann polyenergiden Kern besitzen.

Gattung **Holomastigotoides** Grassi.

H. hertwigi (Fig. 69), brasilianische Form aus Captodermes hartmanni, ist total bewimpert, wobei die einzelnen Wimpern in schwach spiralisch verlaufenden Längsreihen angeordnet sind und von doppelten Basalkörperchen entspringen. Am Vorderende bilden Basalkörperchen eine Art Röhre, die vorn durch einen Knopf, das Zentrosom, abgeschlossen ist, das nochmal durch eine merkwürdige Haube bedeckt ist (Fig. 69 a). Am Hinterende ist eine kleine cilienfreie Stelle, durch die die Nahrung aufgenommen wird. Der etwa im ersten Körperdrittel liegende große Kern bildet bei der Teilung Hunderte von Chromosomen. Zu dieser Art rechnet Hartmann auch kleinere plumpere Formen mit spiralig angeordneten Geißeln. In den letzteren vermutet er weibliche, in den ersteren männliche Individuen. Außerdem werden noch kleinere, den sogenannten Weibchen ähnelnde Formen beschrieben, die aber auch teilweise eine ähnliche Röhre wie die sogenannten männlichen Individuen aufweisen und als Jugendindividuen beider angesprochen wurden. Grassi dagegen errichtet aus den Jugendformen und Weibchen besondere Gattungen. Längsteilung wie multiple Knospung (Gametenbildung?) sind beschrieben. Genaueres über letztere s. oben S. 1210.

Gattung **Trichonympha** Leidy.

Trichonympha agilis (Fig. 70) erinnert in vieler Beziehung an die vorher beschriebene Form, nur sind die Geißeln länger und auf das vordere Körperdrittel beschränkt. Das Vorderende ist ganz ähnlich

Digitized by Google

gebildet. Der Kern, der an der Grenze des vorderen Drittels sich befindet, ist durch

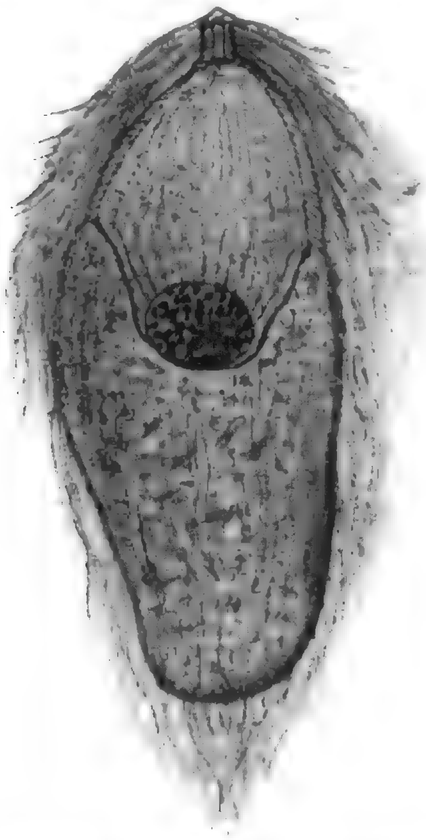


Fig. 70. Trichonympha agilis Leidy. Original.

ein reusen- oder körbchenartig angeordnetes System von Stäben mit der Pellicula verbunden, wodurch das Protoplasma in zwei scharf gesonderte Zonen geschieden wird. Auch hier finden sich ganz ähnliche Jugendformen wie bei der vorigen Gattung.

5. Ordnung **Chromomonadina** Klebs.

Als Chromomonadinen fassen wir nach Klebs und Blochmann zwei Gruppen von vorwiegend pflanzlicher Lebensweise zusammen, die Chrysomonaden und Cryptomonaden. Vielfach werden dieselben auch als gesonderte Ordnungen betrachtet (Senn, Scherffel); für ihre nahe Zusammengehörigkeit hat aber neuerdings Pascher wieder überzeugende Gründe beigebracht. Cytologisch scheinen nach den spärlich vorliegenden Beobachtungen die Chrysomonaden allerdings ziemlich verschieden von den Cryptomonaden, doch läßt sich die größere Komplikation der Kernorganisation bei letzteren im Zusammenhang mit ihrer sonstigen höheren Entwickelung dahin erklären, daß sie sich aus ersteren entwickelt haben. Bei beiden wird übrigens übereinstimmend die generative Komponente bei der Kernteilung vom Amphinukleolus gebildet. Das Verhalten der lokomotorischen ist wenig geklärt; bei Chilomonas sind keine Zentren beobachtet worden. Der Geißelapparat folgt dem zweiten Typus; die Zahl der Geißeln beträgt bei Chrysomonaden 1 oder 2, bei Cryptomonaden stets 2. Beiden Gruppen gemeinsam ist der Besitz von Chromatophoren, die einen vorwiegend braunen Farbstoff enthalten, dessen Zusammensetzung nicht genauer bekannt ist. Dieser Farbstoff variiert bei einzelnen Gattungen und Arten, ja sogar fakultativ bei derselben Art; es gibt hellgrüne, rötliche bis rote, blaugrüne, ja reingrüne Formen. Bei beiden Gruppen finden sich daneben apochromatische (farblose) Arten. Dieselben sind bei den höher organisierten und daher als solche durch ihren Bau gut charakterisierten Cryptomonaden leicht kenntlich. Bei den ihrem Bau nach mit den niederen Protomonadinen übereinstimmenden Chrysomonaden können sie jedoch leicht mit Protomonadinen, speziell Monasarten verwechselt werden. Amöboide Formen resp. Bildung von filosen und retikulosen Pseudopodien kommen bei Chrysomonaden vielfach fakultativ vor. Für einzelne Gattungen in beiden Gruppen sind auch Palmellazustände nachgewiesen. Als eine wohl von Cryptomonaden abzuleitende Gruppe, die geißellose koloniale Verbände bildet, können die Phaeocapsidae angesehen werden. Sexualität ist nur bei letzterem beobachtet.

Die Chrysomonaden sind wohl mit den animalisch sich ernährenden primitiveren Protomonaden aufs nächste verwandt, ob sich hierbei die tierischen Formen durch Rückbildung der Chromatophoren aus den pflanzlichen entwickelt haben oder umgekehrt, ist ein Problem, das wohl nicht zur Entscheidung gebracht werden kann. Von den Cryptomonaden, die ihrerseits wieder auf Chrysomonaden zurückzuführen sind, lassen sich, wie Pascher neuerdings gezeigt hat, durch Formen, wie die von ihm entdeckte Protochrysis und die Phaeocapsidae, einerseits die Braunalgen und andererseits die Dinoflagellaten ableiten.

1. Unterordnung **Chrysomonadina.**

Die Chrysomonaden stimmen in ihrem Bau, speziell in der Organisation der Oberfläche und des Kern- und Geißelapparates zum Teil vollkommen mit den Protomonadinen überein. Wie jene sind sie meistens typisch radiär gebaut und besitzen nur eine dünne Pellicula, sind sogar häufig amöboid. Gallertige oder chitinische Hüllen und Gehäuse sind wie bei jenen weit verbreitet. Was sie von ihnen unterscheidet, ist das Vorhandensein von 1 bis 6 gelbbraunen Chromatophoren, häufig auch eines roten Stigmas. Da aber auch apochromatische Formen vorkommen,

Digitized by Google

kann auch dieser Unterschied wegfallen. Als Assimilat findet sich in der Zelle Leucosin, nur bei wenigen höheren Formen treten auch stärkeähnliche Körnchen auf. Auch die chromatophorenführenden Formen nehmen daneben meist noch geformte Nahrung auf. Die Teilung ist eine Längsteilung meist in beweglichem Zustande. Geschlechtliche Vorgänge sind nicht beobachtet (vgl. dagegen oben bei den wohl hierhergehörigen Monadinen). Koloniebildung ist sehr häufig, manchmal auch verbunden mit geißellosen Palmellastadien, wodurch dann Formen von vollkommen algenähnlichem Habitus (Hydrurus) zustandekommen. Die Cysten werden bei der Mehrzahl endogen gebildet unter Bildung einer verkieselten Membran; sie besitzen einen vorgewölbten Porus mit einem Verschlußstopfen (s. Fig. 31, S. 1193).

Mit Senn teilt man die zahlreichen Gattungen nach der Zahl ihrer Geißeln in folgende 3 Familien:

1. Chromulinidae mit 1 Geißel.
2. Hymenomonadidae mit 2 gleichlangen Geißeln.
3. Ochromonadidae mit 1 Haupt- und 1 Nebengeißel.

Zu den Chrysomonaden gehören ferner zwei wohl nur biologische Gruppen, die aber am besten wegen ihrer Einheitlichkeit auch als besondere systematische Gruppen behandelt werden, nämlich:

4. Silicoflagellidae, eingeißelige Chrysomonaden mit durchbrochenem gitterartigem Kieselskelett, marine Planktonformen.
5. Coccolithophoridae, ein- und zweigeißelige Chrysomonaden mit Schalen, die aus Plättchen von kohlensaurem Kalk zusammengesetzt sind.

1. Familie Chromulinidae Senn.

Diese Familie umfaßt typische Chrysomonaden mit 1 Geißel. Die einfacheren Formen der Reihe sind nackt oder besitzen nur eine feine Pellicula, einen einfachen Kern ohne Außenkern und einfache Vakuolen. Die weiter entwickelten weisen eine deutliche, oft skulpturierte Pellicula, sowie ein komplizierteres Vakuolensystem auf; auch der Kernbau scheint komplizierter zu sein.

Gattung Chrysamoeba Klebs.

Chrysamoeba radians Klebs kann wie die Mastigamöben bald als ovale Schwimmform, bald amöboid mit strahligen Pseudopodien sich darstellen, ja die Geißel kann völlig rückgebildet werden. Sie besitzt zwei symmetrisch gelagerte Plattenchromatophoren (Fig. 71, 1 u. 2). Vermutlich kommen auch bei anderen Chrysomonaden ähnliche Amöboidformen vor.

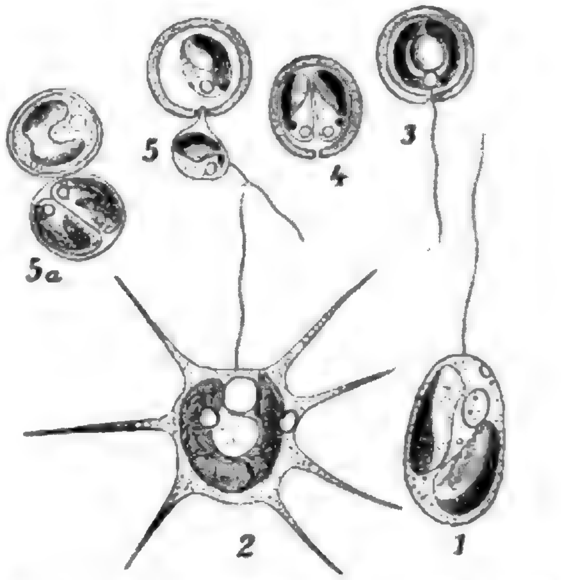


Fig. 71. 1 u. 2 Chrysamoeba radians. 1 Amöboide-, 2 Schwimmform. 3 bis 5 Chrysococcus rufescens. Nach Klebs. Aus Oltmanns.

Gattung Chromulina Cienk.

Aehnliche Gattung, jedoch mit deutlicher, wenn auch feiner Pellicula; nur das Hinterende ist zu amöboider Bewegung und eventuell tierischer Nahrungsaufnahme befähigt. Manche Arten vermehren sich in gallertumhüllten Ruhezuständen, die an der Oberfläche des Wassers staubartige Ueberzüge bilden.

Gattung Hydrurus Agardh.

Hydrurus foetidus Kirchner bildet Kolonien von algenähnlichem Habitus (Fig. 72), die aus fester Gallertmasse mit eingelagerten geißellosen, ovalen Zellen bestehen, die ihren in Einzahl vorhandenen Chromatophor stets nach der Spitze resp. nach außen zu kehren. Am Ende der verzweigten Gallertfäden sitzt stets nur eine Zelle, die sich, ebenso wie die tiefer liegenden durch Längsteilung teilt. Beim Uebergang vom fließenden in stehendes Wasser gehen die Zellen nach Teilung in den Geißelzustand über und schwärmen aus. Die tetraedrisch erscheinende Gestalt der Schwärmer ist durch Pseudopodienbildung bedingt (Nägler ined.). Durch Festsetzen der Schwärmer bilden sich neue Kolonien. Auch Bildung von Cysten im Gallertverband kommt bei ungünstigen Lebensbedingungen vor.

Digitized by Google

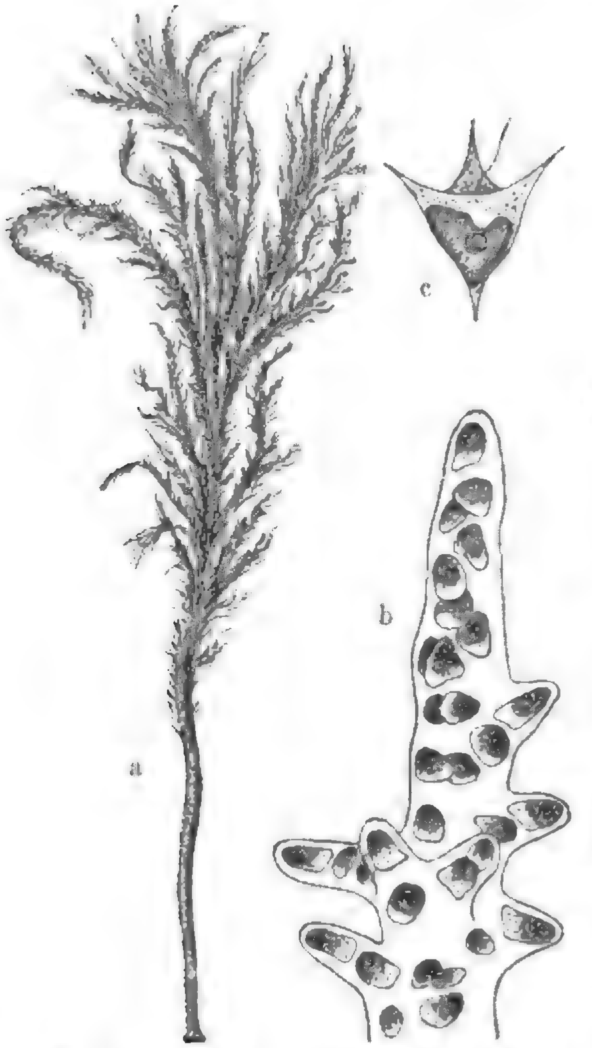


Fig. 72. Hydrurus. a Kolonie, b Teil stärker vergrößert, c Schwärmer. Aus Oltmanns.

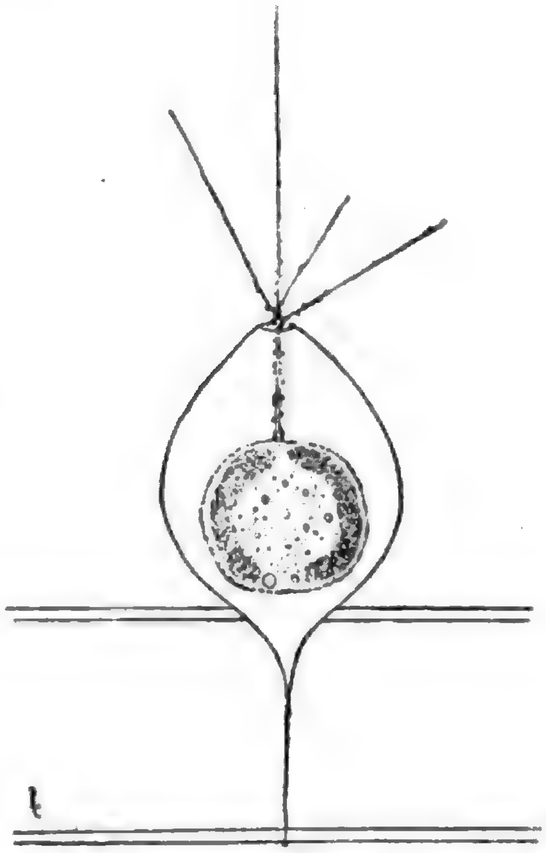


Fig. 73. Chrysopyxis bipes Iwan. Nach Lauterborn.

Gattung **Chrysococcus** Klebs.

Chrysococcus rufescens Klebs (Fig. 71, 3 bis) ist eine eingeißelige, mit 2 Chromatophoren und Augenfleck ausgestattete Chrysomonade, die vor allem durch ihre dicke, mit Eiseneinlagerung versehene kugelige Schale charakterisiert ist. Die Vermehrung geschieht durch Längsteilung innerhalb des Gehäuses, worauf eine Tochterzelle durch die Geißelöffnung heraustritt und sich ein neues Gehäuse bildet.

Gattung **Chrysopyxis** Stein.

Diese Gattung enthält Formen mit weichem, auf Algen festsitzendem Gehäuse. Die Species Chrysopyxis bipes Stein ist dadurch ausgezeichnet, daß nach Fertigstellung des Gehäuses die Geißel rückgebildet wird und dafür feine Rhizopodien entstehen (Fig. 76).

Im Anschluß hieran sei bemerkt, daß neuerdings auch Chrysomonaden beschrieben sind, von denen nur geißellose, aber mit Rhizopodien versehene Stadien beobachtet wurden.

Gattung **Mallomonas** Perty.

Eingeißelige Chrysomonaden mit fester Hülle (Pellicula), die aus dachziegelförmig angeordneten Kieselplättchen besteht, die meistens längere oder kürzere Kieselnadeln tragen. Beispiel: Mallomonas ploesslii (Fig. 74).

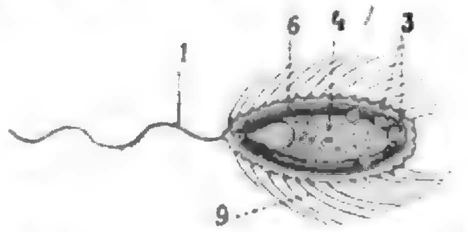


Fig. 74. Mallomonas ploesslii Perty. Nach Klebs. Aus Lang.

Gattung **Chrysosphaerella** Lauterborn.

Chrysosphaerella longispina Lauterborn (Fig. 75), die einzige Art dieser merkwürdigen Gattung, bildet traubige Kolonien aus zahlreichen birnförmigen Individuen, die von einer Gallerthülle umgeben sind. Die Einzelindividuen sind von einer verkieselten, aus einzelnen Plättchen bestehenden Hülle umgeben, besitzen 2 Chromatophoren mit je einem Augenfleck und tragen am Vorderende rechts und links der Geißel 2 lange röhrenförmige Kieselnadeln, die mit je einem kelchartigen Ge-

Digitized by Google

bilde im Körper beweglich befestigt sind. Süßwasser.

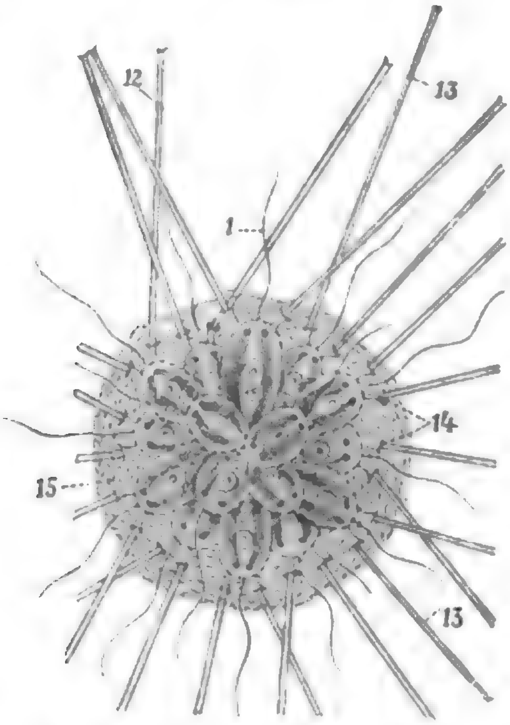


Fig. 75. Chrysosphaerella longispina Lauterborn. Nach Lauterborn. Aus Lang.

2. Familie **Hymenomonadidae** Senn.

Die Familie umfaßt sämtliche Chrysomonaden mit 2 gleichen Geißeln, die wie die Chromulinidae von niederen nackten Formen zu beschalten höher organisierten aufsteigen.

Gattung **Syncrypta** Ehrenb.

Syncrypta volvox (Ehr.) Die nur mit zarter Pellicula versehenen verkehrteiförmigen Individuen sind durch Gallerte zu äußerlich volvoxartigen Kolonien vereinigt (Fig. 76).

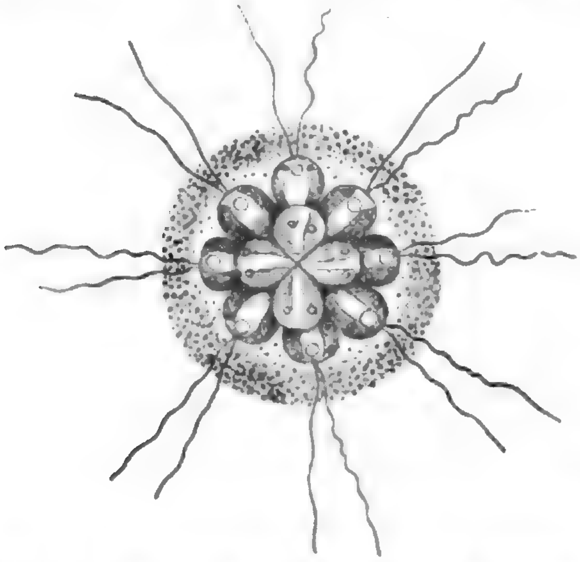


Fig. 76. Syncrypta volvox Ehr. Nach Stein. Aus Oltmanns.

Die Gattungen Stylochrysalis und Derepyxis mit gestielten Gehäusen entsprechen der Gattung Chrysopyxis bei den Chromuliniden.

Gattung **Hymenomonas** Stein.

Die Gattung ist ausgezeichnet durch den Besitz einer weichen Hülle (Pellicula), innerhalb welcher das Protoplasma der Zelle zu selbständiger Bewegung fähig ist, welche aber bei der Teilung doch mit durchgeschnürt wird (Hymenomonas roseola [Stein], Fig. 77).

Fig. 77. Hymenomonas roseola Stein. Nach Klebs. Aus Oltmanns.

Gattung **Synura** Ehrenb.

Die mit dem schwanzartig ausgezogenen Hinterende zu Kolonien vereinigten Individuen besitzen eine hautartige Hülle (Pellicula), aus der die Zellen vor der Teilung nackt herausschlüpfen und sich meist im Palmellastadium vermehren. Auch amöboide Formen mit rückgebildeter Geißel kommen dabei vor (Pascher).

3. Familie **Ochromonadidae** Senn.

Hierher gehören die Chrysomonaden mit einer Haupt- und einer Nebengeißel. Sie schließen sich eng an die eingeißeligen Chromulinidae an.

Gattung **Ochromonas** Wyssotzki.

Einzellebende Formen mit zarter Pellicula, oft wie Chrysamoeba in amöboiden Zustand übergehend. Ochromonas mutabilis Klebs (Fig. 78).

Fig. 78. Ochromonas mutabilis Klebs. Nach Senn.

Gattung **Uroglena** Ehr.

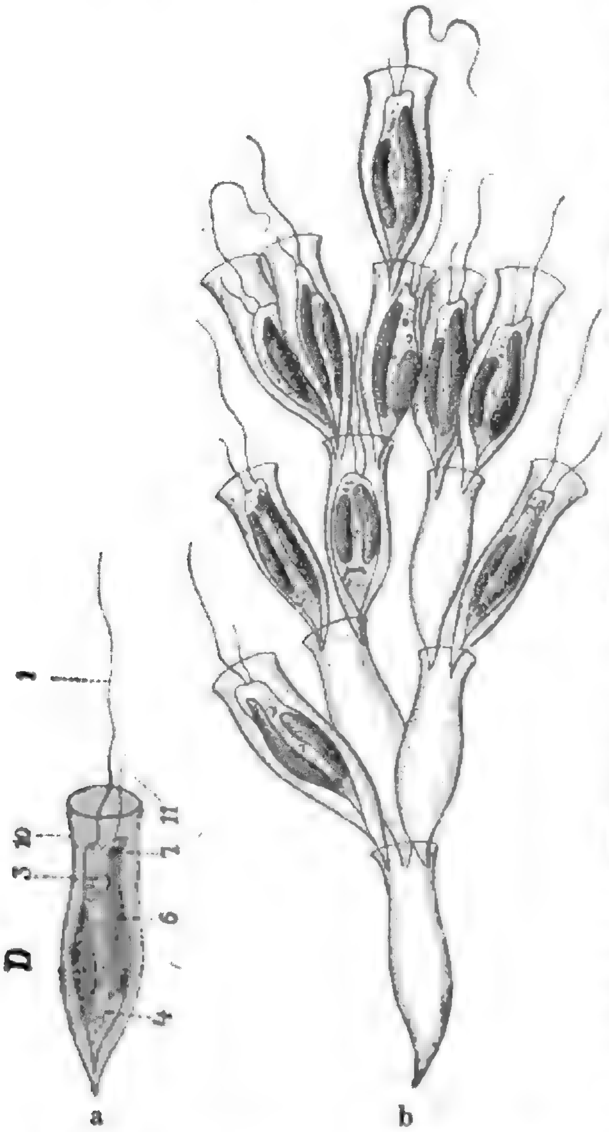
Uroglena volvox bildet wie Syncrypta volvocineenartige Kolonien.

Gattung **Dinobryon** Ehr.

Die Gattung ist ausgezeichnet durch den Besitz von becherartigen Ge-

Digitized by Google

häusen, in der die Zellen mit dem stielartig ausgezogenen Hinterende festsitzen. Nach der Teilung schlüpft in der Regel nur eine Tochterzelle aus, bleibt aber am oberen Ende des Gehäuses hängen und bildet ein neues Gehäuse. Auf diese Weise können dann Kolonien entstehen.



a b

Fig. 79. Dinobryon sertularia Ehr. Aus Oltmanns.

Es werden neuerdings eine große Anzahl von Untergattungen, Arten und Varietäten unterschieden. Dinobryon sertularia Ehr. (Fig. 79).

4. Familie **Silicoflagellidae** Borgert.

Die marinen Silicoflagellaten stimmen im Bau der Zellen ganz mit primitiven Chromuliniden überein und unterscheiden sich nur durch den Besitz eines gegitterten Kieselskelettes. Deshalb an eine Verwandtschaft mit Radiolarien zu denken, liegt nicht der geringste Grund vor. Es sind typische Chrysomonaden; daher gebührt ihnen auch keine besondere Unterklasse im System der Flagellaten, ja bei ihrer Uebereinstimmung mit Chromuliniden kaum eine besondere Familie, die nur aus praktischem Interesse zugestanden sei. Beispiel: Distephanus speculum Ehr. (siehe Fig. 6, S. 1181).

5. Familie **Coccolithophoridae** Lohmann.

Die ebenfalls rein marinen, im Plankton vorkommenden Coccolithophoriden sind Chrysomonaden mit 1 oder 2 Geißeln, die durch den Besitz eines eigentümlichen Gehäuses charakterisiert sind, das aus sogenanntenCoccolithen, mannigfach gestalteten Scheiben von kohlensaurem Kalk zusammengesetzt ist. Obwohl es sich vermutlich um eine polyphyletische Gruppe handelt (Vorkommen von ein- und zweigeißeligen Formen), sind dieselben in ihren sekundären Merkmalen (Schalenbau) so einheitlich, daß man sie als geschlossenes Ganzes behandelt. Die 8 Gattungen werden nur nach ihrer Schale unterschieden (Lohmann). Hier sei nur als Beispiel eine der Formen genannt (Syracosphaera pulchra Lohm., siehe Fig. 5, S. 1180).

2. Unterordnung **Cryptomonadina** Stein em. Pascher.

Die Cryptomonaden sind im Gegensatz zu den Chrysomonaden stets dorsiventral gebaut und besitzen eine bestimmt orientierte Furche, die oft mit kleinen Körnchen (Trichocysten?) besetzt ist und meist über das Apikalende hinweggeht, damit den Formen eine apikale Ausrandung gibt und unsymmetrisch zur Mediane liegt. Bei den vorgeschrittenen Formen senkt sich diese Furche median zu einem verschiedentlich ausgebildeten Schlunde ein. Chromatophoren vorhanden oder fehlend, doch auch im letzteren Falle wird bei Chilomonas keine geformte Nahrung aufgenommen und das für die Unterordnung charakteristische Stoffwechselprodukt, nämlich echte Stärke, gebildet. Bei den primitiven Formen findet sich noch keine echte Stärke, dagegen amyloide Körner. Alle Formen besitzen zwei bandförmige Geißeln, von denen die eine ganz wenig kürzer ist als die andere. Geißelinsertion nach dem zweiten Typus, Kern meist mit stark ausgebildetem Außenkern. Der Umfang der Unterordnung ist hier im Anschluß an Pascher weiter gefaßt, als es bisher meist üblich war, indem Formen, die früher als Chrysomonaden galten, hierher gestellt werden.

Gattung **Cryptochrysis** Pascher.

Form mit zarter Pellicula, mit Furche, aber ohne Schlund, mit 2 meist gelappten Chromatophoren. Assimilat amyloide Körner. Teilung im beweglichen Zustand. Crypto-

Digitized by Google

Crypto-
s phaeo-
orum
r. Nach
cher.

chrysis commutata Pascher einzige Art (Fig. 80).

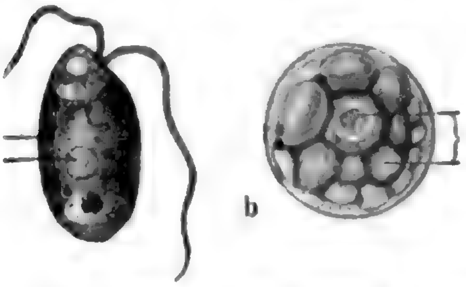
Wyssotzkia biciliata Wyss. Aehnliche Art, doch mit sehr metabolischem Körper und gleichzeitiger tierischer Ernährung. Vermehrung im unbeweglichen Zustand. Früher meist zu den Chrysomonaden gestellt.

Gattung **Protochrysis** Pascher.

Diese Gattung ist ausgezeichnet dadurch,
e Furche in die Aequatorialebene
rutscht ist und die Geißeln somit
stehen. Sie kann als ein Ausgangs-
für die Entwickelung der Dino-
ten angesehen werden. Einzige Art
hrysis phaeophycearum Pasch
Fig. 17, S. 1185).

Gattung **Cryptomonas.**

ische Cryptomonaden mit derber,
streifter Pellicula und deutlichem
l. Assimilat echte Stärke. Hierher
auch die meisten Zooxanthellen,
nbiotisch in niederen Tieren (Radio-
Foraminiferen usw.) leben, so z. B.
omonas schaudinni in der Fora-
e Peneroplis pertusus (Fig. 81).



Cryptomonas schaudinni Winter.
Nach Winter. Aus Doflein.

Gattung **Chroomonas** Hansg. em. Pascher.

hältnismäßig primitive Formen mit
2 blaugrünen bis blauen Chromato-
z. B. Chroomonas baltica.

attung **Rhodomonas** Karsten.

allele Gattung mit rotbraunen Chro-
oren.

ttung **Cyathomonas** Fromental

ische Cryptomonade mit fester Pelli-
d deutlichem Schlund mit sogenanntem Schlundring. Ohne Chromatophoren mit tierischer Ernährung. Die einzige Art Cyathomonas truncata (siehe Fig. 7, S. 1181 und Fig. 19, S. 1187) wurde vielfach zu den Protomonadinen gestellt, ist aber neuerdings durch Uleha als echte Cryptomonade erwiesen.

Gattung **Chilomonas** Ehrenb.

Chilomonas paramaecium Ehrenb. ist eine langgestreckte Cryptomonade mit tiefem Schlund, aus dessen Grunde die Geißeln entspringen und der mit besonderen Körnern (Trichocysten) ausgekleidet ist. Ernährung saprophytisch, doch im Plasma viele Stärkekörner. Vermehrung durch Längsteilung im beweglichen Zustand.

An diese typischen Cryptomonaden sind nun auch nach Pascher eine Reihe von Formen anzuschließen, die den größten Teil ihres Lebens im unbeweglichen, gallertigen Ruhezustand verbringen und größere Lager, ja völlig algenähnliche Kolonien bilden. Sie wurden früher meist den Chrysomonaden angegliedert, finden aber, wie Pascher gezeigt hat, ihre richtige Stellung hier; sie werden von Pascher als Familie der Phaeocapsidae zusammengefaßt. Hier seien nur einige Typen kurz beschrieben.

Gattung **Phaeocystis** Lagerh.

Phaeocystis poucheti Lag., eine marine Planktonform, bildet Kolonien in Form stark gelappter Blasen, die im Innern Flüssigkeit enthalten. Die ruhenden Zellen können sich teilen und dann ausschwärmen, um neuen Kolonien den Ursprung zu geben. Der Flagellatenzustand ist noch nicht genauer untersucht, zeigt aber nach den vorliegenden Abbildungen Cryptomonadencharakter.

Bei der im Süßwasser auf Cladophoren angeheftete scheibenartige Kolonien bildenden Naegeliella flagellifera und dem auf feuchter Erde usw. in Form gallertiger Massen auftretenden Phaeococcus clementi Borzi ist der Cryptomonadencharakter der Schwärmer noch deutlicher.

Gattung **Phaeothamnion** Lagerh.

Bei dieser Gattung, die im Süßwasser auf Cladophoren sich findet, weisen die Kolonien schon ganz den Charakter von Fadenalgen auf und es ist Geschmacksache, ob man sie noch als Flagellat oder als niedersten Vertreter der Braunalgen betrachten will. Die Schwärmer besitzen Cryptomonadenorganisation. Nach Borzi können die Individuen der Kolonie nach Abrundung auch zwei bis vier Schwärmer (Gameten) bilden, die kopulieren (Fig. 82).

Digitized by Google

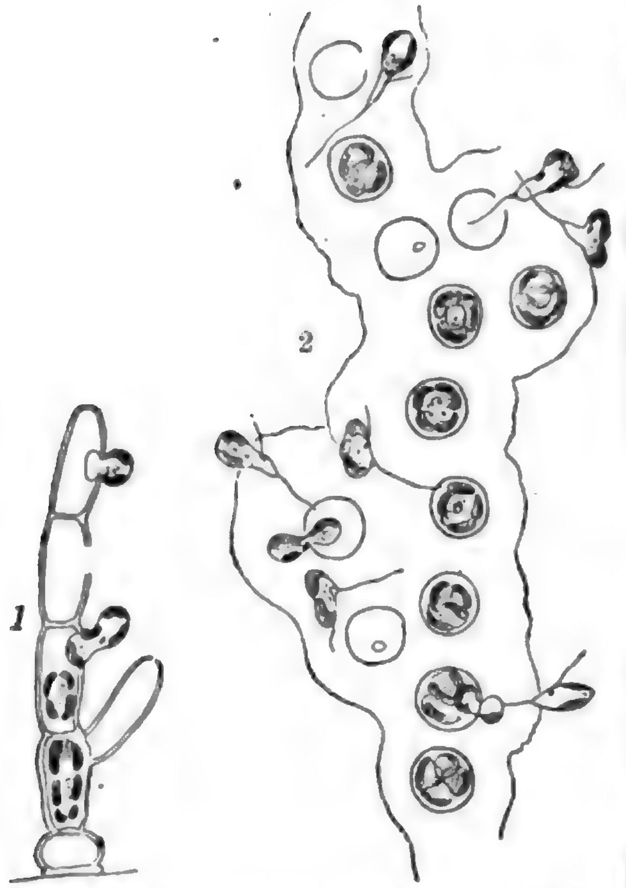


Fig. 82. **Phaeothamnion confervicolum Lag.** 1 kleine Kolonie Schwärmer bildend, 2 Bildung von Gameten. Nach Borzi. Aus Oltmanns.

Ordnung **Chromomonadina** Klebs.

Die Chromomonadina sind eine kleine, nur wenige Formen umfassende Gruppe, die aber infolge ihrer eigentümlichen Organisation und mangels deutlicher Uebergangsformen zu anderen Gruppen mit Klebs als besondere Ordnung zu betrachten ist. Die hierher gehörigen Formen haben eine deutliche aber zarte Pellicula und sind mehr oder weniger metabol. Sie besitzen zahlreiche scheibenförmige Chromatophoren (mit Ausnahme der apochromatischen Thaumatomastix), jedoch kein Stigma. Als Assimilationsprodukt findet sich fettes Oel. Am Vorderende neben der Geißel befindet sich ein System von 2 bis 3 Vakuolen. Die Ernährung ist holophytisch oder saprophytisch. Es sind 2 ungleich große Geißeln vorhanden und große Kerne nach Euglenaart. Die Vermehrung findet im Ruhezustand statt, die Cysten besitzen oft eine Gallerthülle. Die ganze Gruppe ist noch sehr wenig erforscht.

Gattung **Vacuolaria** Cienk.

Vacuolaria virescens (Fig. 83) hat einen birnförmigen stark metabolen Körper (56 bis 138 μ), eine Vorder- und eine Schleppgeißel, die aus einer Vertiefung am Vorderende entspringen. Unter der Pellicula findet sich ein Alveolarsaum. Vermehrung in Gallertcysten.

Gattung **Rhaphidomonas** Stein.

Der Körper dieser Gattung ist eiförmig, stark zusammengedrückt, wenig metabol.

Fig. 83. **Vacuolaria virescens Cienk.** Nach Senn.

Fig. 84. **Rhaphidomonas semen Stein.** Nach Stein. Aus Senn.

Gegenüber der vorigen ist sie durch den Besitz von Trichocysten am Vorderende gekennzeichnet, Rhaphidomonas semen Ehr. (Fig. 84).

Gattung **Thaumatomastix** Lauterborn.

Thaumatomastix setifera Lauterb. Farblose Art, abgeplattet, mit feinen Borsten auf der Pellicula, vermag von der Ventralseite plötzlich feine Pseudopodien zu entsenden, die wahrscheinlich im Dienste der Nahrungsaufnahme stehen.

7. Ordnung **Euglenoidina** Klebs.

Die Euglenoidina sind sehr hoch entwickelte Flagellaten, die durch eine feste, oft gestreifte oder skulpturierte Plasmamembran, ein kompliziertes, aus Haupt- und Nebenvakuolen bestehendes Vakuolensystem und das Vorkommen von Paramylon ausgezeichnet sind. Außerdem kommt noch fettes Oel als Stoffwechselprodukt vor. Der Körper ist meist metabol, doch ist auch hierbei die Pellicula durch Einlagerung spiral verlaufender Fibrillen gefestigt; auch

Digitized by Google

vollkommen starre Formen sind sehr häufig. Grüne Chromatophoren vorhanden oder fehlend, bei vielen Formen ein rotes Stigma. Bei Formen mit Aufnahme fester Nahrung findet sich ein Mund. Die 1 bis 2 Geißeln sind am Vorderende in einer Grube, bei Formen mit Schlund am Grunde desselben inseriert. Die Kerne sind fast durchweg vom 3. Kerntypus, der direkt der Euglenidentypus genannt werden kann (s. allg. Teil S. 1182).

Ernährung holophytisch, saprophytisch oder tierisch. Kopulation nur bei der nicht typischen Form Copromonas beobachtet.

1. Familie **Euglenidae** Ehrenberg.

Ein- bis zweigeißelige Formen mit grünen Chromatophoren und rotem Augenfleck. Ernährung in der Hauptsache holophytisch, doch besteht Neigung für organische Stoffe. Häufig rotierende Bewegung, auch spiralige Drehung der Körperachse.

Gattung **Eutreptia** Perty.

Spindelförmige, hinten zugespitzte Gestalt mit 2 gleichlangen Geißeln. Lebhafte Körpermetabolie. Membran zartgestreift, die Chromatophoren sind scheibenförmig. Das Vakuolensystem besteht aus mehreren pulsierenden Nebenvakuolen, die in die Hauptvakuole einmünden.

Eutreptia viridis in Süß- und Salzwasser.

Gattung **Euglena** Ehrbg.

Ebenfalls metabole Formen von spindelförmiger bis bandförmiger Gestalt. Plasmamembran ziemlich derb und meist spiralig gestreift durch Einlagerung elastischer Fibrillen. Chromatophoren von verschiedener Gestalt, die bei Kultur in starken organischen Nährlösungen oder im Dunkeln zu Leukoplasten reduziert werden. Eine Geißel, die aber mit zwei „Geißelwurzeln" im Plasma verankert ist. Die zweite Geißelwurzel entspricht wahrscheinlich einer zweiten rückgebildeten Geißel. Teilung meist in abgekugeltem Zustand.

Euglena viridis Ehr. (Fig. 85), mit sternförmigem Chromatophor und spindelförmiger Gestalt.

Euglena oxyuris Schm. mit scheibenförmigen Chromatophoren und spiralig gedrehter Gestalt.

Euglena sanguinea durch Ausbildung eines roten Farbstoffes häufig blutrot gefärbt; mit grünen Chromatophoren.

Gattung **Phacus** Nitzsch.

Stark abgeplattete Gestalt mit deutlich spiralig gestreifter Pellicula. Metabolie ist infolge der starken Ausbildung der Plasmamembran nicht möglich. Scheibenförmige Chromatophoren. Phacus pleuronectus Nitsch (Fig. 86).

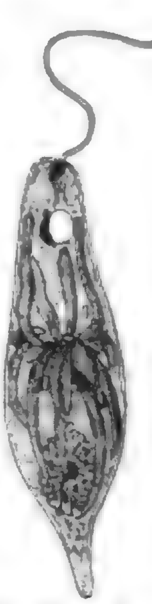


Fig. 85. Euglena viridis Ehr. Nach Senn.

Fig. 86. Phacus pleuronectus Nitzsch. Nach Senn.

Gattung **Trachelomonas** Ehrbg.

Freischwimmende Form mit festem Gehäuse, das nur eine Oeffnung zum Durchtritt der Geißel besitzt. Nach der Teilung verläßt ein Tochtertier das Gehäuse in nacktem Zustand, um darauf selbst ein Gehäuse zu bilden, das zunächst noch weich ist, bald aber erstarrt und durch Einlagerung von Eisensalzen braun gefärbt wird. Metabolie innerhalb der Hülle lebhaft.

Trachelomonas hispida Stein (siehe Fig. 4, S. 1180) mit stacheligem Gehäuse.

2. Familie **Astasiidae** Bütschli.

Farblose, in ihrer Organisation den Euglenen sehr nahestehende Formen, mit einer langen, oder einer langen und einer kurzen stummelförmigen Geißel. Ernährung saprophytisch, Teilung im Geißelzustand. Süßwasser-, marine und parasitische Arten.

Gattung **Astasia** Duj.

Spindelförmig mit stark metaboler Bewegung, farblos, eine Geißel, Plasmamembran meist gestreift. Kern im hinteren Körperabschnitt. Astasia margaritifera Schmarda (Fig. 87).

Gattung **Distigma** Ehrbg.

Unterscheidet sich von Astasia durch den Besitz einer zweiten kurzen Geißel und noch stärkere Körpermetabolie. Distigma proteus Ehrbg. mit zentralgelegenem Kern.

Digitized by Google

3. Familie **Peranemidae** Stein.

Etwas abweichende Formen mit saprophytischer oder tierischer Ernährung. Meistens Differenzierung in Bauch- und Dorsalseite. Auf ersterer liegt die spaltförmige Mundöffnung; selten liegt sie terminal. Die Tiere kriechen meist auf der Bauchseite, nur wenige schwimmen unter Rotation des Körpers. Zuweilen ist ein Schlundorgan vorhanden, das bei Entosiphon vorgestülpt werden kann. Die Familie ist wahrscheinlich nicht ganz einheitlich. Nach Zahl und Anordnung der Geißeln und der Art der Oberfläche teilt Senn die Peranemidae in mehrere Unterfamilien. Von den Gattungen seien hier genannt:

Gattung **Anisonema** Duj.

Zwei Geißeln, von denen die eine, in ihrer ganzen Länge schlagend, nach vorn gehalten wird, während die zweite als Schleppgeißel funktioniert. Plasmamembran glatt oder gestreift. Auf der Bauchseite verläuft eine Längsfurche, in der die Mundöffnung liegt. Anisonema acinus Duj. mit euglenaartigem Kern. Vakuolensystem links.

Fig. 87. Astasia margaritifera Schmarda. Nach Senn.

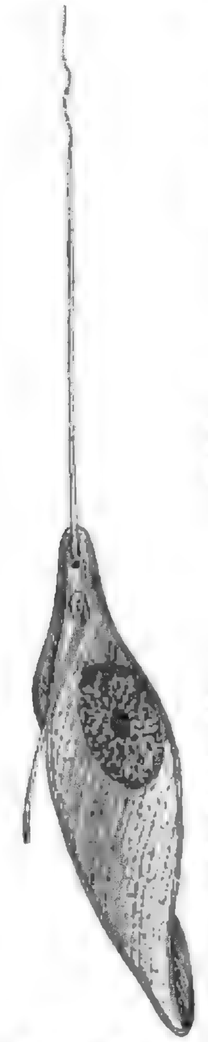


Fig. 88. Heteronema klebsii Senn.

Gattung **Entosiphon** Stein.

Ovale, nur wenig abgeplattete Form mit 2 Geißeln. Mundöffnung fast terminal mit langem, vorstreckbarem „Staborgan". Entosiphon sulcatum Duj. (siehe Fig. 8, S. 1181).

Gattung **Heteronema** Stein.

Ebenfalls zweigeißlig, doch wird die Schwimmgeißel nur am Vorderende bewegt, die hintere Geißel ist sehr kurz. Metabol, Membran meist schraubig gestreift. Heteronema klebsii Senn (Fig. 88). Körper langgestreckt, spiralig gedreht, Kern groß.

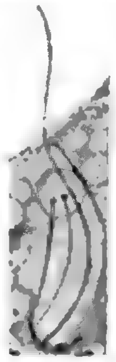
Gattung **Petalomonas** Stein.

Ebenfalls nach Senn Vertreter einer besonderen Unterfamilie. Nur eine Geißel, die bei der Bewegung nach vorn gestreckt und nur an der sich verjüngenden Spitze bewegt wird. Formbeständig, Membran nicht gestreift. Abgeplattete, unsymmetrische Formen von oft bizarrer Gestalt.

Gattung **Peranema** (Ehr.) Stein.

Vertreter der gleichen Unterfamilie der Peranemidae. Die Geißel wird ruhig nach vorn gehalten und nur die Spitze führt rotierende Bewegungen aus. Die Geißel entspringt am Grunde des tiefen Schlundes von einem Basalkorn, daneben eine zweite Geißelfibrille, die aber nur bis zur Mundöffnung reicht und mit einem Knopf endet (Fig. 89). Plasmamembran ziemlich fest

Fig. 89. Schlundregion mit Insertion der Geißeln und Staborgan von Peranema trichophorum. Nach Hartmann und Chagas.



und spiralig gestreift. Metabol. Peranema trichophorum Stein, Süßwasser.

Gattung **Scytomonas** Stein.

Der nicht metabole Körper ist oval bis länglich, die Geißel rotiert nur an der Spitze. Plasmamembran fest, nicht gestreift. Scytomonas ist die einzige Euglenoide, bei der Kopulation sicher beobachtet ist. Kern mit großem Caryosom, Augenkern wenig ausgebildet.

Scytomonas subtilis Dobell. Teilung im freibeweglichen Zustand. Der Kern soll sich dabei amitotisch teilen. In den Kulturen kommt regelmäßig Kopulation

Digitized by Google

vor, worauf die Zygote eine Dauercyste bildet. Aus Froschkot.

Scytomonas major Berliner. Aehnliche, aber größere Form. Bei der Kernteilung bildet das Caryosom eine Spindel mit Zentriolen und Aequatorialplatte, während der Außenkern anscheinend regellos verteilt wird. Er bildet dabei Pseudopolplatten.

II. Subklasse **Dinoflagellata** Bütschli.

Die Dinoflagellaten oder Peridineen bilden trotz ihrer außerordentlichen Mannigfaltigkeit in der äußeren Gestaltung eine einheitliche, gut abgegrenzte Gruppe, die durch ihre Geißelverhältnisse und den Kernbau, bei den typischen Formen außerdem durch die besondere Gestaltung der Oberfläche (Furchenstruktur und Zellulosepanzer) charakterisiert sind. Es finden sich zwei ungleiche Geißeln, die bei den Prorocentriden am Vorderende, bei den übrigen typischen Formen jedoch ähnlich wie bei der Cryptomonade Protochrysis (s. Fig. 17, S. 1185) von der Seite (Bauchseite) entspringen, wobei eine, die Längsgeißel in einer Furche der Oberfläche (Längsfurche) nach rückwärts gerichtet ist, während die zweite, die Quergeißel, in der sogenannten Querfurche sich um den Körper schlingt. Letztere führt in ihrer Furche nur schlängelnde Wellenbewegungen aus, erstere schlägt peitschenförmig. Die typischen Peridineen besitzen eine konstante Gestalt, an der eine Bauch- und Rückenseite, sowie ein apikaler (vorderer) und antapikaler Pol unterschieden werden. Die Oberfläche ist nur bei den Gymnodinien nackt resp. weist nur eine feine Pellicula oder dünne Zellulosemembran auf, bei allen übrigen Formen finden sich feste Panzer, die zwar nicht reine Zellulosereaktion geben, aber doch vorwiegend aus Zellulose bestehen. Der Zellulosepanzer ist oft mit mannigfaltigen Fortsätzen (Schwebevorrichtungen) ausgestattet; Abbildungen und Beschreibungen davon finden sich in dem Artikel „Plankton". Bei Gymnodinien kommen auch geißellose Formen vor, die nur noch gelegentlich oder überhaupt keine Flagellaten- (Schwärmer-) Stadien bilden; auch die Furchenstruktur kann rückgebildet sein. Derartige Formen können einen vollkommen algenartigen Habitus annehmen. Eine dieser Formen Pyrocystis erscheint durch Gallerteinlagerung im erwachsenen Zustand als große geißellose Kugeln, die sehr an das Cystoflagellat Noctiluca erinnern, das wohl von solchen Formen abzuleiten ist. Die meisten Formen sind holophytisch und besitzen viele kleine, sehr zarte Chromatophoren; doch kommt auch tierische Ernährung vor und neuerdings sind eine Anzahl parasitischer Formen bekannt geworden.

Das Vakuolensystem (s. Fig. 9, S. 1181) sowie Kernbau und Kernteilung (s. Fig. 14) wurden schon im Allgemeinen Teil beschrieben.

Die Vermehrung findet im beweglichen oder ruhenden Stadium durch ein- oder mehrmalige Teilung statt, und zwar bei Prorocentriden und Dinophysiden durch Längsteilung, bei Gymnodinien und Peridiniden durch Querteilung, resp. schiefe Teilung. In manchen Fällen findet eine ein- oder mehrmalige Teilung im Innern der alten Membran oder von Gallertcysten statt, und die „Schwärmer" bilden dabei neue Membranen aus. Bei Pyrocystis lunula teilt sich der Körper innerhalb seiner Hülle, der „Muttercyste", in 16 Teile, die zu den sogenannten gehörnten Cysten (Fig. 90c) werden. Nach Zerreißen der Muttercyste entstehen in diesen 8 (selten nur 1, 2 oder 4) Gymnodien, die ausschwärmen (Fig. 90d). Man vermutet in ihnen Gameten, doch ist

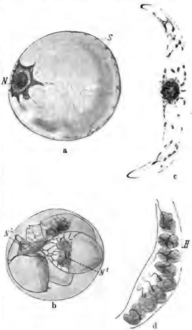


Fig. 90. Pyrocystis lunula Schütt. a Muttercyste, b Stadium mit 4 Teilprodukten, c gehörnte Cyste, d dieselbe nach Bildung der 8 Gymnodiniumschwärmer. Nach Dopiel. Aus Doflein.

Digitized by Google

nichts Sicheres über Befruchtungsvorgänge bekannt; dagegen ist für ein parasitisches Gymnodium eine derartige Gametenbildung und Befruchtung beobachtet. Für Ceratium hirundinella ist von Zederbauer eine Hologamie nach Austritt aus dem Panzer angegeben worden; doch kann es sich auch um eine zufällige Plasmogamie handeln.

Die Dinoflagellaten werden eingeteilt in 4 Familien: 1. Prorocentridae Schütt. 2. Gymnodinidae Bergh, 3. Peridinidae Bergh, 4. Dinophysidae Bergh u. Stein. Die 3 letzten Familien werden vielfach als Ordnung Dinifera zusammengefaßt und der 1. als Ordnung Adinida gegenübergestellt.

1. Fam. **Prorocentridae** Schütt.

Dinoflagellaten ohne Furchenstruktur mit 2 Geißeln am Vorderende, von denen die eine gerade nach vorwärts gerichtet ist, die andere seitlich wellenförmig sich herumschlingt (Quergeißel). Feste Membran aus 2 gleichen Zelluloseschalen, die in der Sagittalebene (Gürtelebene) mit zugeschärften Rändern übereinandergreifen. Am Vorderende an einer der Schalen eine Ausrandung als Geißelspalte. Fortpflanzung durch Längsteilung in der Gürtelebene, wobei je ein Tochtertier eine Schalenhälfte mitbekommt und die andere dann neubildet. Marine Planktonformen.

Gattung **Exuviaella** Cienkowsky.

Oval, schwach abgeplattet. Zwei große plattenförmige oder viele kleine scheibenförmige gelbe Chromatophoren. E. marina Cienk. (Fig. 91).

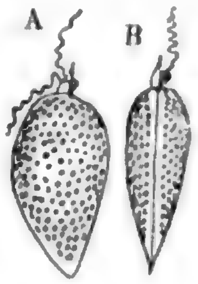


Fig. 92. Prorocentrum micans Ehr. A von der Fläche, B von der Nahtseite. Nach Schütt. Aus Oltmanns.

2. Fam. **Gymnodinidae** Bergh.

Typische Dinoflagellaten mit Furchenstruktur und in der Längsfurche auf der Bauchseite nahe beieinander entspringender Längs- und Quergeißel. Querfurche oft schraubig. Oberfläche entweder nackt (manchmal amöboid) oder mit feiner Membran. Fortpflanzung Querteilung im beweglichen Zustand oder in Cysten. Marin, Süßwasser und parasitisch.

Gattung **Gymnodinium** Stein.

Mit den Charakteren der Familie (Fig. 93).

Gattung **Pyrocystis** Murray.

Im erwachsenen Zustand geißellose, stark gallertige Kugel. Vermehrung s. oben S. 1222 und Fig. 90.

Gattung **Polykritos** Bütschli.

Polyenergide Formen, die durch eine Art Koloniebildung Ketten von unvollkommen getrennten (2, 4 oder 8) Individuen mit entsprechenden Geißelpaaren, aber nur 2 Kernen bildet (Fig. 94).

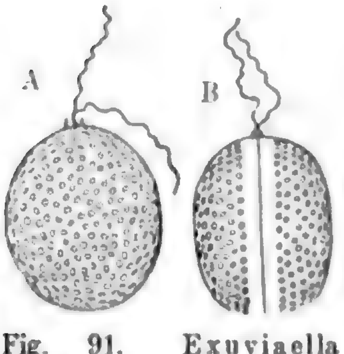


Fig. 91. Exuviaella marina Cienk. A von der Fläche, B von der Nahtseite. Nach Schütt. Aus Oltmanns.

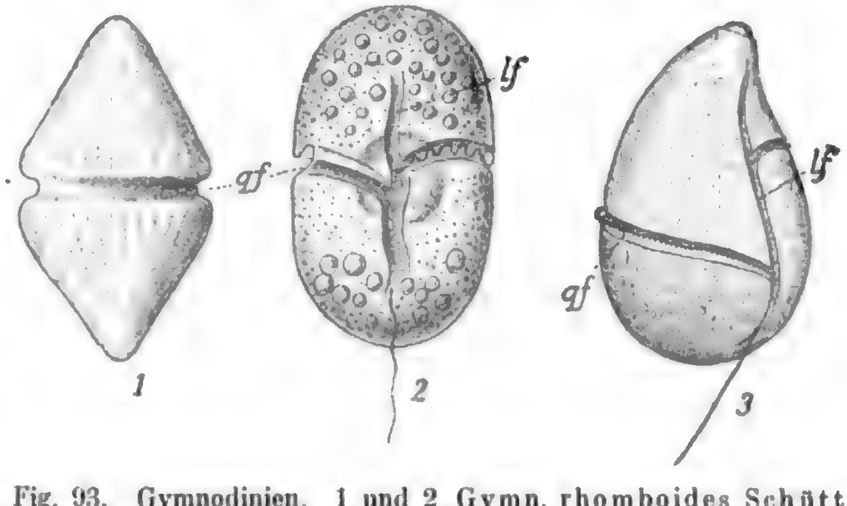


Fig. 93. Gymnodinien. 1 und 2 Gymn. rhomboides Schütt von der Rücken- (1) und Bauch (2) seite, 3 G. spirale Bergh, qf Querfurche, lf Längsfurche. Nach Schritt. Aus Oltmanns.

Gattung **Prorocentrum** Ehrenberg.

Herzförmig, stark abgeplattet. Neben der Geißelspalte zahnartiger Fortsatz. Pr. micans Ehr. (Fig. 92).

Gattung **Blastodinium** Chatton.

Geißellos, parasitisch im Darm pelagischer

Digitized by Google

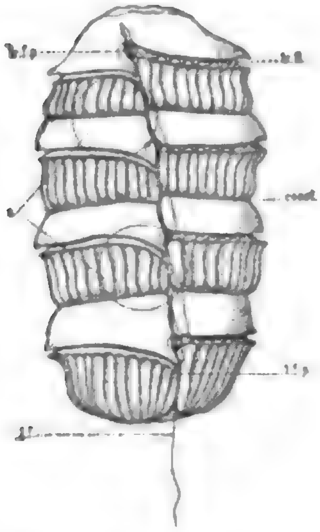


Fig. 94. Polykritos schwartzi Bütschli. Bauchseite. Konstante Einschnürung zwischen den Individuen, lf Längsgeißel, lrp Porus der Längsgeißelspalte, n Kerne, trfl Quergeißel, trfp Quergeißelporus. Nach Kofoid. Aus Doflein.

Copepoden. Bildet durch eigenartige Vermehrung innerhalb der ursprünglichen Membran merkwürdige Kolonien, deren Einzelindividuen als kleine Gymnodinien ausschwärmen.

3. Fam. **Peridinidae** Bergh.

Typische Dinoflagellaten mit Furchenstruktur und aus einzelnen Platten bestehendem Zellulosepanzer. Die Querfurche liegt in einer besonderen Platte, der Ringtafel (Fig. 95), welche zusammen mit der die Längsfurche enthaltenden Schloßtafel den Gürtelpanzer bildet. In der Schloßtafel die Geißelspalte. Auch die übrigen Platten der sogenannten Ober- und Unterschale sind in für die Arten charakteristischer Zahl und Anordnung ausgebildet. Vermehrung durch schiefe Teilung, wobei der Panzer schief aufreißt und jedes Tochtertier eine Hälfte erhält, während der Rest neugebildet wird (Fig. 96). Von den zahlreichen Gattungen seien genannt:

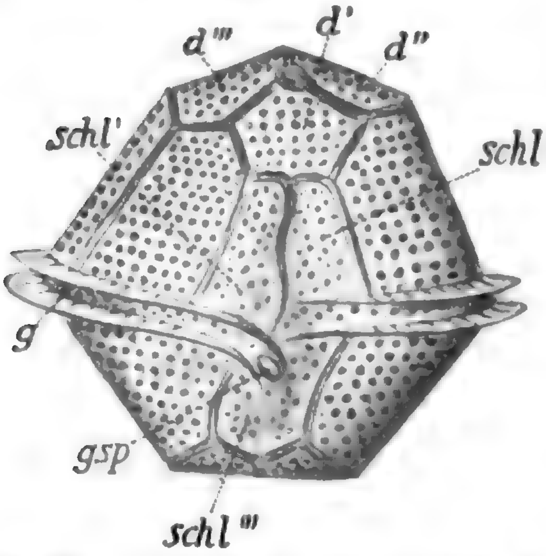


Fig. 95. Goniodoma acuminatum Ehr. Von der Bauchseite. g Gürtelpanzer mit Querfurche, schl Schloßplatte, d Deckeltafeln, gsp Geißelspalte. Nach Schütt. Aus Oltmanns.

Gattung **Goniodoma** Stein.

Regelmäßige polyedrische Form, tiefe Ringfurche etwa in der Mitte. Marin. G. acuminatum Ehr. (Fig. 95).

Gattung **Ceratium** Schrank.

Deckelplatten zu langen Hörnern ausgezogen. Kettenbildung verbreitet. C. hirundinella, Süßwasser (Fig. 96).

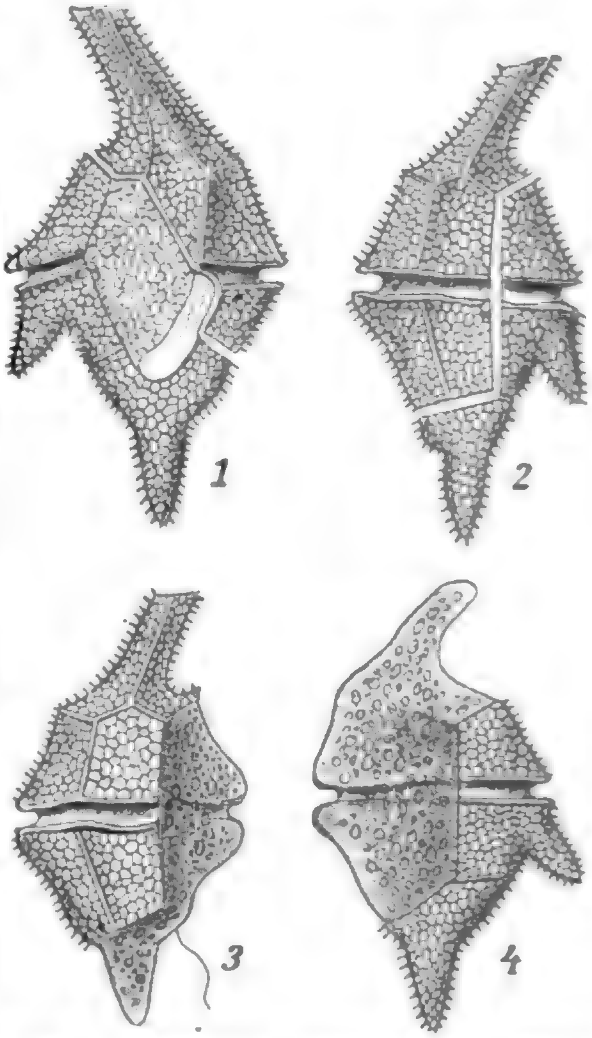


Fig. 96. Ceratium hirundinella. Teilungsstadien. Aus Oltmanns.

4. Fam. **Dinophysidae** Stein u. Bergh.

Dinoflagellaten mit Furchenstruktur; Querfurche weit nach vorn verschoben. Zellulosepanzer durch eine Sagittalnaht in 2 Hälften geteilt. Ober- und Unterschale sonst nicht aus einzelnen Platten zusammengesetzt. Vermehrung durch Längsteilung in der Sagittalnaht. Von den zahlreichen, oft mit bizarren Fortsätzen ausgestatteten Formen sei hier nur Dinophysis acuta Ehr. als Beispiel erwähnt (Fig. 97).

III. Subklasse **Cystoflagellata** Häckel.

Diese Klasse umfaßt nur drei Gattungen mit je einer Art, die durch reichliche Gallert-

Digitized by Google

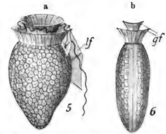


Fig. 97. Dinophysis acuta Ehr. a von der Seite, b vom Rücken. Nach Schütt. Aus Oltmanns.

einlagerung in die von einer kräftigen Pellicula umschlossene Zelle eine für Flagellaten enorme Größe erreicht haben. Sie besitzen eine Geißel, die nicht mehr der Fortbewegung dient. Chromatophoren sind nicht vorhanden, sie ernähren sich animalisch. Alle drei Formen sind marine Planktonformen. Wegen ihrer großen Verschiedenheit seien im folgenden die beiden bekanntesten Formen einzeln betrachtet.

Gattung **Noctiluca** Sur.

Noctiluca miliaris (Fig. 98), die einzige Art weist einen kugeligen Körper von 1 bis 1,5 mm Durchmesser auf, der aber nur zum kleinsten Teil aus Protoplasma besteht, das in Form von reichlich sich verästelnden Strängen (ähnlich wie Pflanzenzellen) die nach außen durch eine feste Pellicula abgegrenzte Kugel durchzieht, während der Rest mit gallertiger Substanz ausgefüllt ist. Nur an dem oberen Pol findet sich eine größere Ansammlung von Protoplasma, das sogenannte Zentralplasma, in welches der Kern eingelagert ist und von dem aus die übrigen Plasmastränge strahlig auslaufen. An diesem Pole befindet sich auch eine leichte Einstülpung der Pellicula, das Peristom, an dessen Grunde eine spaltförmige Mundöffnung liegt. Im Vorderende des Peristoms entspringt ein tentakelartiges Organ, das eine Querstreifung aufweist, die sogenannte Bandgeißel. Mit einer Flagellatengeißel hat dieses Organ nichts zu tun. Eine echte Geißel findet sich dagegen an der Peristomwand, doch führt sie nur sehr schwache Bewegungen aus und dient vermutlich zur Nahrungsaufnahme. Der Kern ist außerordentlich groß, neben ihm findet sich ein in einer großen Sphäre liegendes Zentriol. Genaueres über Bau und Teilung des Kernes s. im allgemeinen Teil S. 1184. Noctiluca ernährt sich von allerhand Protozoen, sowie kleinen Metazoen (Copepoden).

Von Fortpflanzungsvorgängen ist sowohl eine einfache Längsteilung, als auch eine multiple Knospung mit Bildung kleiner Schwärmer bekannt. Die früher angegebene Konjugation, sowie Kopulation erwachsener Tiere ist nicht sicher gestellt, da es sich um Teilungsstadien oder Plasmogamien handeln kann. Eventuell sind die bei der multiplen Knospung entstehenden Schwärmer

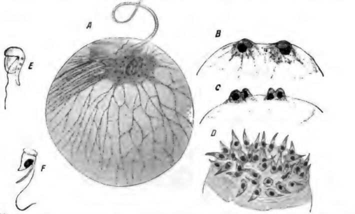


Fig. 98. Noctiluca miliaris Sur. A vegetatives Individuum, B bis D Schwärmerbildung, E, F Schwärmer. Aus Doflein.

Digitized by Google

die Gameten. Ein Tier bildet 250 bis 500 derartige Schwärmer, die eine Art Querfurche, eine nach hinten gerichtete Geißel, sowie einen merkwürdigen Fortsatz aufweisen, der vermutlich später zur Bandgeißel wird. Die Geißel wird vom Zentriol aus gebildet. Die ganze Gestalt der Schwärmer erinnert sehr an Gymnodinien.

Noctiluca ist eine kosmopolitische Form, die manchmal in ungeheuren Mengen auftritt. Ihren Namen hat sie von ihrer Fähigkeit zu phosphoreszieren (Meerleuchten).

Gattung **Leptodiscus** R. Hertwig.

Leptodiscus medusoides (Fig. 99) ist bisher nur in Messina gefunden. Der Körper

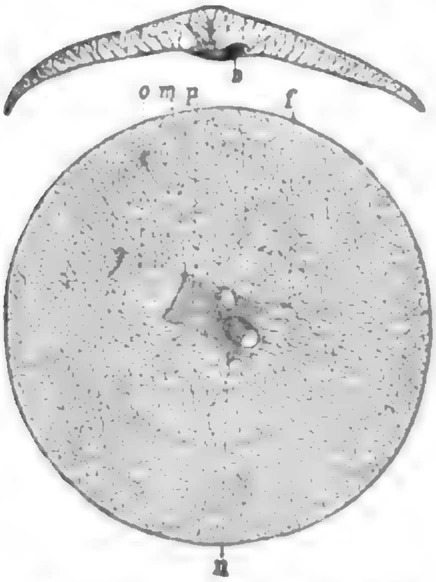


Fig. 99. Leptodiscus medusoides R. Hertwig. Optischer Durchschnitt (oben), von der Fläche (unten). f Geißel, m Mund, n Kern, o Zuleitung zum Mund, p Protoplasmastrang. Nach R. Hertwig.

hat die Form einer leicht gewölbten Scheibe oder Schale, ähnlich dem einer Meduse. An der höchsten Stelle der Wölbung liegt das Zentralplasma mit Kern. Neben dem Kern findet sich eine Mundöffnung, auf der andern Seite ein Kanal, an dessen Grunde die kleine Geißel entspringt. Die Tiere schwimmen nach Art der Medusen durch Rückstoß, indem die Peripherie der Scheibe sich rhythmisch kontrahiert. Diese Kontraktion soll bedingt sein durch Myoneme, die auf der konkaven Seite verlaufen.

Literatur. *Zusammenfassende größere Werke, in denen sich die weitere Literatur findet:* **Bütschli**, *Protozoen II, in:* **Bronn**, *Klassen und Ordnungen des Tierreiches, 1882 bis 1887.* — **Doflein**, *Lehrbuch der Protozoenkunde, 3. Aufl. Jena 1911 (hier die neuere Literatur ziemlich vollständig).* — **Lang**, *Vergleichende Anatomie, 2. Aufl., 1. Lief., Protozoa. Jena 1901.* — **Oltmanns**, *Morphologie und Biologie der Algen. Jena 1904.* — **v. Prowazek**, *Handbuch der pathogenen Protozoen. Leipzig 1907 bis 1913.* — **Senn**, *Flagellaten in:* **Engler und Prandtl**, *Natürliche Pflanzenfamilien. Leipzig.* — *Ferner die einschlägigen Artikel in* **Kolle-Wassermann**, *Handbuch der pathogenen Mikroorganismen, 2. Aufl. Jena 1912 u. 1913.*

M. Hartmann und H. Schüssler.

Flexur

= Schichtenbiegung (vgl. den Artikel „Schichtenbau“).

Flourens

Marie Jean Pierre.

1794 bis 1867, Professor der vergleichenden Anatomie in Paris, einer der berühmtesten Experimentalphysiologen der Neuzeit. Er wurde geboren in Mauveilhon bei Béziers (Département Hérault), lebte seit 1848 in Paris als Privatmann und war ständiger Sekretär des Instituts. Seine Arbeiten betreffen u. a. die Entwickelungsgeschichte, die Hirnphysiologie und die Ernährung der Knochen. 1837 entdeckte er als „point vital“ das respiratorische Zentrum. Flourens war auch ein bedeutender Schriftsteller und Stilist. Die Titel einiger seiner Schriften lauten: Cours sur la génération, l'ovologie et l'embryologie etc. (Paris 1836); Recherches expérimentales sur les propriétés et les fonctions du système nerveux etc.; Théorie expérimentale de la formation des os (1847).

Literatur. *Biogr. Lex. ed. Pagel.*

J. Pagel.

Flöz.

Früher Synonym für „Schicht“ (Flözgebirge = geschichtete Gesteine), heute nur noch angewendet für technisch-wichtige Schichten oder Lager (Steinkohlenflöz, Kupferschieferflöz usw.).

Fluoreszenz.

1. Fundamentalerscheinung. 2. Erregung der Fluoreszenz. Stokes' Regel. 3. Absorption und Fluoreszenz. Sichtbare und ultraviolette Fluoreszenz. 4. Beobachtung der Fluoreszenz. 5. Ultraviolette Fluoreszenz des Benzols. 6. Einfluß der Substituenten auf die Fluoreszenz der Benzolverbindungen. 7. Einfluß der Salzbildung auf die Fluoreszenz. 8. Einfluß des Lösungsmittels auf die Fluoreszenz. 9. Fluoreszenz bei nichtaromatischen Verbindungen. 10. Fluoreszenz bei anorganischen Stoffen. 11. Elektroatomistische Deutung der Fluoreszenzerscheinungen.

Digitized by Google

1. Fundamentalerscheinung. Die Fluoreszenz gehört wie die mit ihr verwandte Phosphoreszenz zu den Lumineszenzerscheinungen (vgl. die Artikel „Lumineszenz“ und „Phosphoreszenz“), bei denen die Strahlungsvorgänge ohne entsprechende Temperatursteigerung vor sich gehen und für die das Kirchhoffsche Gesetz von Absorption und Emission keine Gültigkeit hat. Fluoreszenz nennt man die eigenartige Lichtemission, die gewisse Stoffe bei Beleuchtung mit starken Lichtquellen zeigen und die momentan wieder verschwindet, falls die erregende Lichtquelle entfernt wird. Die von der Lichtquelle getroffenen Körper werden somit unter dem Einfluß des Lichtfeldes gewissermaßen selbstleuchtend. Zur Beobachtung der Fundamentalerscheinung der Fluoreszenz erzeugt man durch Sonnenlicht oder eine andere helle Lichtquelle mit Hilfe einer Sammellinse einen Strahlenkegel in der zu untersuchenden Substanz, z. B. einer Lösung. Ist letztere optisch leer, d. h. frei von schwebenden Teilchen, so ist bei Abwesenheit von Fluoreszenz der Strahlengang innerhalb des Körpers nicht zu beobachten. Bei fluoreszenzfähigen Stoffen hingegen geht von dem Strahlenkegel Licht bestimmter Farbe, das Fluoreszenzlicht aus, das nicht polarisiert ist und sich dadurch von dem in optisch nicht leeren, d. h. trüben Medien auftretendem Opaleszenzlicht unterscheidet.

Charakteristisch für diese Strahlungsvorgänge ist, daß das in den fluoreszierenden Körper eindringende Licht nicht einfach absorbiert und in Wärme verwandelt, sondern teilweise als Licht von anderer Brechbarkeit abgegeben wird.

Die Eigenschaft der Fluoreszenz ist nicht an einen bestimmten Aggregatzustand gebunden. Von festen Stoffen sei Flußspat genannt, von dem die Erscheinung ihren Namen erhalten hat, ferner Anthracen, das in reinem Zustande prächtig blau fluoresziert. Mit fluoreszierenden Lösungen, die die organische Chemie in sehr großer Zahl kennt, werden wir uns noch eingehend zu beschäftigen haben. Stoffe, die in gasförmigem Zustande fluoreszenzfähig sind, kennt man im Jod, sowie verschiedenen Metallen, wie Natrium und Quecksilber. Fluoreszenz ist ferner sowohl bei indifferenten Stoffen als auch bei Elektrolyten aufgefunden; als Beispiele für erstere seien die Lösungen gewisser Kohlenwasserstoffe in Alkohol, Aether usw., für letztere die wässerigen Lösungen des Fluoreszeinnatriums, des salzsauren Fluorindins und ähnliche genannt.

Eine vollständige Zusammenstellung der fluoreszierenden Stoffe findet man in dem von H. Konen bearbeiteten Artikel Fluoreszenz in Kaysers Handbuch der Spektroskopie, Bd. 4.

In den Fällen der fluoreszierenden Lösungen genügen häufig äußerst geringe Konzentrationen zur Ausbildung eines deutlichen Effektes. Fluoreszein und Eosin verraten in wässeriger Lösung noch Fluoreszenz bei Konzentrationen, wo der Nachweis dieser Stoffe durch andere Methoden kaum oder doch nur ganz unsicher gelingt; so ist Eosin in molekularen Konzentrationen von ca. 10^{-10} noch nachweisbar (1 g/Mol. in 10000 Mill. Liter Wasser). Bekanntlich macht man von dieser Eigenschaft Anwendung zur Untersuchung des Laufes unterirdischer Quellen.

Bis vor wenigen Jahren hatten die Fluoreszenzerscheinungen lediglich physikalische Bedeutung, den Chemiker interessierten sie nur insofern, als er sie zur Charakterisierung und Identifizierung chemischer Individuen benutzen konnte. Diese Sachlage hat sich jedoch geändert, nachdem Beziehungen zwischen dem Bau des chemischen Moleküls und der Eigenschaft zu fluoreszieren aufgefunden wurden. In diesem Artikel soll vorwiegend eine Darstellung der chemischen Seite des Problems gegeben, die physikalische Seite nur berührt werden; eine eingehendere Berücksichtigung der letzteren findet man im Artikel „Lumineszenz“. Bei der höher entwickelten Systematik der organisch-chemischen Verbindungen werden vorwiegend diese zu berücksichtigen sein.

2. Erregung der Fluoreszenz; Stokes' Regel. Genaue spektralanalytische Untersuchungen ergaben einen wichtigen Zusammenhang zwischen der Natur des erregenden und des ausgestrahlten Lichtes. Wie zahlreiche Versuche besonders mit fluoreszierenden Lösungen gezeigt haben, sind es die stärker brechbaren Strahlen, die blauen, violetten und ultravioletten, die die Emission des Fluoreszenzlichtes bewirken, während die weniger brechbaren, z. B. gelben und roten Strahlen, die Erscheinung nicht hervorrufen. Diese Tatsache wurde schon von Stokes (1852) aufgefunden und nach ihm die Stokessche Regel benannt; wie spätere Untersuchungen erwiesen, ist sie jedoch nicht ohne Ausnahme, indem eine Reihe stark farbiger Stoffe häufig auch durch kurzwelligere Strahlen zur Fluoreszenz erregt werden können als der Wellenlänge des ausgesandten Fluoreszenzlichtes entspricht. In der Regel handelt es sich bei der Erscheinung jedoch um eine Verwandlung der in den Stoff eindringenden Strahlen von großer Brechbarkeit in solche von geringerer Brechbarkeit.

3. Absorption und Fluoreszenz. Sichtbare und ultraviolette Fluoreszenz. Als

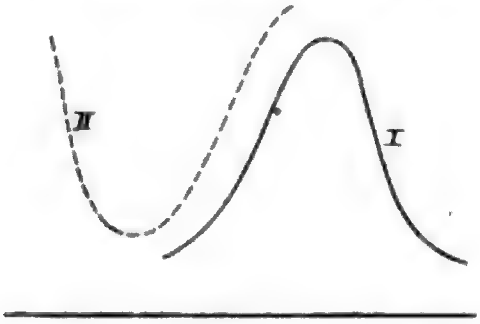
Digitized by Google

weitere direkte Folgerung aus den Versuchen sind die ohne Ausnahme geltenden Beziehungen zwischen Absorption und Fluoreszenz zu erwähnen: Stets ist mit einer Fluoreszenz auch Absorption des Lichtes verknüpft. Alle für unser Auge farblosen Stoffe, die etwa in Lösung violette oder blauviolette Fluoreszenz zeigen, besitzen Absorption im Ultraviolett. Die in der Durchsicht gelben Stoffe mit meist grüner Fluoreszenz zeigen Absorption in Blau, rote Stoffe fluoreszieren meist gelb, während blaue, d. h. in Gelb absorbierende Stoffe meist rotes Fluoreszenzlicht aussenden (s. die folgende Tabelle).

Farbe im durchfallenden Lichte	Absorption im	Fluoreszenzfarbe	Beispiel
farblos	Ultraviolett	violettblau	schwefelsaures Chinin, Anthracen
gelborange	Blau	grün	Fluorescein
rot	Grün	gelb	Dimethylnapht-Eurhodin
blau	Gelb	rot	Fluorindin in Salzsäure

Wird das Fluoreszenzlicht spektral zerlegt, so zeigen sich entweder eine oder mehrere Banden, die in der Regel bei einer bestimmten Wellenlänge ein Maximum der Intensität besitzen. Diesem Maximum entspricht ein Minimum der Absorptionskurve, d. h. in der Intensität des durch den Stoff unter ähnlichen Bedingungen hindurchgelassenen Lichtes, das zugleich gegenüber dem Fluoreszenzmaximum nach der Seite der kürzeren Wellen verschoben ist, wie beistehende Skizze schematisch erläutern soll, wo auf den Ordinaten die Intensitäten des emittierten und absorbierten Lichtes aufgetragen sind.

In ähnlicher Weise wie die Absorption nicht auf den verhältnismäßig kleinen,



0.5 μ 0,6 μ

I Fluoreszenz-Spektrum II Absorptions-Spektrum

Fig. 1.

unserem Auge zugänglichen Teile des Spektrums beschränkt ist, werden wir auch eine Ausdehnung des Fluoreszenzlichtes zu beiden Seiten des sichtbaren Teils des Spektrums erwarten. Eine Fluoreszenz im Ultrarot scheint mit Sicherheit noch nicht aufgefunden zu sein; doch ist sie, wie wohl zuerst Kauffmann dargetan hat, unter Berücksichtigung der Beziehungen zwischen Konstitution und Fluoreszenz noch in manchen Fällen zu erwarten. Eine ultraviolette Fluoreszenz ist kürzlich von Stark aufgefunden worden und zwar auf Grund bestimmter Anschauungen über die Entstehung der Emissionsspektren im Sinne der Elektronentheorie. Nach Stark wird die Fluoreszenz bedingt durch Absorption in einem nach Rot abschattierten Bandenspektrum und allen fluoreszierenden Stoffen ist die Eigenschaft gemeinsam, typisch selektiv zu absorbieren. In der Tat ergibt eine Durchmusterung der sichtbar fluoreszierenden, chemisch einheitlichen Stoffe, daß alle Absorptionsbanden besitzen, die teils im Sichtbaren, teils im Ultravioletten liegen.

4. Beobachtung der Fluoreszenz. Zur subjektiven Beobachtung der Fluoreszenzerscheinungen sind zahlreiche Vorrichtungen beschrieben; die Beobachtungen werden nur dann schwierig, wenn es sich um äußerst schwache Strahlungen handelt. Zur Beobachtung der Lage der Fluoreszenz wird das ausgesandte Licht spektral zerlegt und das Fluoreszenzspektrum zweckmäßig photographiert. Aus den früher mitgeteilten Tatsachen ergibt sich zugleich eine Regel für die Beobachtung der Fluoreszenzerscheinungen: man wird in der Mehrzahl der Fälle eine an ultravioletten Strahlen reiche Lichtquelle wählen und das sichtbare Licht möglichst ausschalten. Sehr vollkommen ist das bei den von H. Lehmann konstruierten Ultraviolett-Lichtfiltern erreicht. Zur Erregung ultravioletter Fluoreszenz bedient man sich der Quecksilber-(Quarz-)Bogenlampe oder des Zink- und Aluminiumfunkens (weiteres s. im Artikel „Lumineszenz").

5. Ultraviolette Fluoreszenz des Benzols. Die interessanteste Anwendung des eben berührten Prinzips von Stark ist die Entdeckung der Fluoreszenz des Benzols im ultravioletten Teile des Spektrums, auf die, wie später noch näher zu begründen sein wird, eine befriedigende Systematik der Fluoreszenzerscheinungen nach chemischen Gesichtspunkten begründet werden konnte.

Digitized by Google

Wie die Untersuchungen von Hartley bewiesen haben, ist das für die sichtbaren Strahlen völlig durchlässige Benzol in reinem Zustande so gut wie undurchlässig für die kürzeren ultravioletten Strahlen und zeigt in sehr verdünnten Lösungen mit geeigneten durchlässigen Medien, wie Alkohol, typische Absorptionsbanden. Auch einfache Derivate des Benzols, wie die Dioxybenzole, Benzophenon, Phtalsäure, ferner die dem Benzol nahestehenden Verbindungen, wie Naphtalin und Anthracen, weisen, wie die Untersuchung von Stark und R. Meyer lehrte, die gleichen Beziehungen zwischen Fluoreszenz und Absorption auf:

Substanz	Absorptionsspektrum	Fluoreszenzspektrum[1])
Benzol	7 Bänder 233—271 $\mu\mu$	4 Bänder 267—310 $\mu\mu$
Naphtalin	4 Bänder 242—320 $\mu\mu$	9 Bänder 314—357 $\mu\mu$
Anthracen	4 Bänder 320—380 $\mu\mu$	4 Bänder 380—450 $\mu\mu$
Brenzcatechin	Band 242—291 $\mu\mu$	Band 288—404 $\mu\mu$
Resorcin	Band 242—287 $\mu\mu$	Band 292—430 $\mu\mu$
Hydrochinon	Band 257—317 $\mu\mu$	Band 313—450 $\mu\mu$

In allen Fällen erscheinen die Fluoreszenzbanden gegenüber den Absorptionsbanden entsprechend der Stokesschen Regel nach dem weniger brechbaren Ende des Spektrums verschoben.

Nach den Untersuchungen von Stark und seinen Mitarbeitern ist die Fluoreszenz als eine gemeinsame Eigenschaft vieler Benzolderivate erkannt worden. Daß bei manchen Verbindungen, wie Naphtalin, Anilin, den Dioxybenzolen u. a. die Lichtemission im Ultraviolett liegt, bedingt natürlich keine prinzipielle Scheidung dieser Stoffe von denen mit sichtbarer Fluoreszenz. Denn wie die Untersuchung des Benzols, Naphtalins und Anthracens ergab, werden mit zunehmender Kondensation, d. h. mit zunehmendem Kohlenstoffgehalt die Fluoreszenzbanden aus dem Ultraviolett ganz allmählich verschoben, bis sie in das Sichtbare gelangen (s. Figur 2).[2])

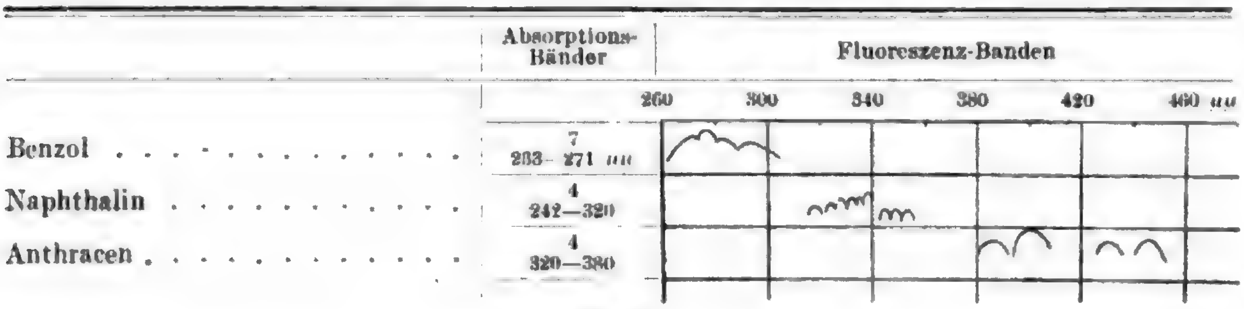


Fig. 2.

Wie in anderen Fällen ändert sich die Fluoreszenz durch eine rein konstitutive Aenderung in ähnlicher Weise wie die Lichtabsorption.

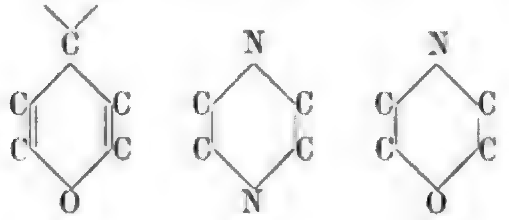
Bei den nahen Beziehungen zwischen Fluoreszenz und Lichtabsorption war zu erwarten, daß erstere Eigenschaft auch in vielen Beziehungen zur chemischen Konstitution der Verbindungen stehen mußte. In der Tat ergaben die Untersuchungen über sichtbare Fluoreszenz, die allerdings in der Regel mehr einen rein qualitativen Charakter trugen, daß derartige Beziehungen existieren.

Der erste, welcher aus der großen Zahl von Einzeltatsachen über Fluoreszenz bei organischen Verbindungen Gesetzmäßigkeiten herauszuschälen versuchte, war

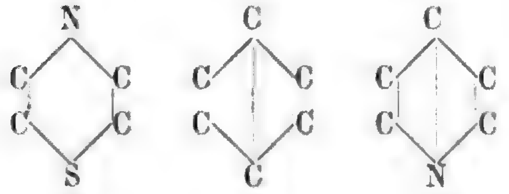
[1]) Nach einer neueren, sehr sorgfältigen Untersuchung von E. Dickson (Zeitschr. f. wiss. Phot., 1912, Bd. 10) sind die Fluoreszenzspektra einiger aromatischer Kohlenwasserstoffe komplizierter als in der obigen Tabelle angegeben, so zeigt Benzol 6 Banden, deren Kanten zwischen den Wellenlängen 259,9 und 291,0 liegen, Naphtalin gab ein aus 14 schmalen Banden bestehendes Fluoreszenzspektrum zwischen λ:300,0 und 365,4, Triphenylmethan lieferte ein sehr charakteristisches kurz- und langwelliges Spektrum, im kurzwelligen Gebiet 4 Banden (λ:268,6 bis 283,2), im langwelligen Gebiet 4 Banden (λ:371,7 bis 425,8). Die abweichenden Beobachtungen der früheren Beobachter erklären sich wohl zum Teil durch die verschiedene Erregung der Fluoreszenz. Stark benutzt den Quecksilberbogen, Dickson Zinkfunken, bei denen die Linien zwischen 2000 und 2100 A bis E wesentlich energiereicher sind als beim Quecksilberbogen.

[2]) Für obige Figur gelten die Bemerkungen der vorigen Fußnote.

R. Meyer. Wie die Chromophore die Farbe organischer Verbindungen bedingen, so sollte Fluoreszenz durch die Anwesenheit ganz bestimmter Atomgruppen im Molekül der strahlungsfähigen Stoffe entstehen, die er als Fluorophore bezeichnete. Als derartige Gruppen betrachtete er gewisse sechsgliedrige, meist heterozyklische Ringe, wie den Pyron- (I), Azin- (II), Oxazin (III), Thiazinring (IV), sowie die im Anthracen und Acridin enthaltenen Ringe (V) und (VI).

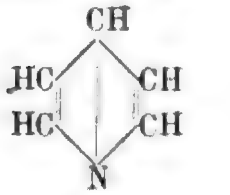


I II III

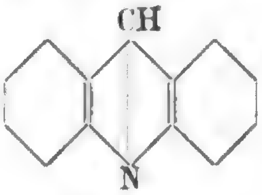


IV V VI

Ferner wird hervorgehoben, daß das Vorhandensein des Fluorophors allein noch keine Fluoreszenz bedingt, daß diese vielmehr erst zustande kommt, wenn die fluorophoren Gruppen zwischen anderen, dichteren Atomkomplexen gelagert sind, z. B.:

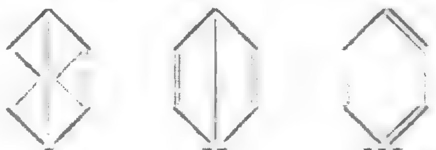


Pyridin, nicht fluoreszierend



Acridin, blau fluoreszierend.

Aehnlich sind die von H. Kauffmann entwickelten Ansichten über die Beziehungen zwischen Konstitution und Fluoreszenz. Er nennt in direkter Anlehnung an die Terminologie, die bei den bekannten Beziehungen zwischen Farbe und chemischer Konstitution gebräuchlich ist, die in den fluoreszierenden Verbindungen enthaltenen Ringe Luminophore: diese sollen die Eigenschaft besitzen, durch gewisse Energiearten, wie Tesla- und Radiumstrahlen, nicht jedoch durch Licht zur Lichtemission angeregt werden zu können, und an und für sich nicht fluoreszenzfähig zu sein. Diese letzte Eigenschaft wird den Luminophoren erst durch die Anwesenheit anderer Atomgruppen verliehen, die Kauffmann Fluorogene nennt. In vielen Fällen ist der Träger der Lumineszenz (z. B. durch Teslastrahlen) der Benzolring, den sich Kauffmann in bezug auf die Verteilung der doppelten und einfachen Bindungen nicht als starr, sondern als beweglich denkt. In Anlehnung an v. Baeyer unterscheidet Kauffmann drei Grenzzustände des Benzols, die durch die Diagonal- (I), die Dewarsche (II) und die Kekulésche Formel (III) zum Ausdruck gebracht werden können.



I II III

Je nach der Natur der Substituenten kommt dem Benzolderivat eine jener Formeln zu, oder, was wahrscheinlicher ist, sie entspricht einem zwischen den obigen extremen Grenzzuständen liegenden Zustand.

Die auxochrom wirkenden Amino- und Hydroxylgruppen oder die alkylsubstituierten Gruppen (NH_2—NHR—NR_2; OH—OR) haben die Tendenz, den der Dewarschen Formel entsprechenden Zustand herbeizuführen, in dem die Verbindungen einzig und allein lumineszenzfähig sein sollen. So zeigen Dimethyl-p-phenylendiamin, Hydrochinondimethyläther, Anilin u. a. kräftige Lumineszenz unter dem Einfluß von Teslastrahlen. Befinden sich die Benzolderivate aber erst im Dewarschen Zustand, so kann durch Einführung geeigneter Gruppen (COOH, C:C, CN usw.), der Fluorogene, die Verbindung fluoreszenzfähig werden. In der blau fluoreszierenden Anthranilsäure o-C_6H_4.NH_2.COOH soll beispielsweise Anilin den Luminophor darstellen, der durch die Anwesenheit der fluorogenen Karboxylgruppe zur sichtbaren Fluoreszenz angeregt worden ist.

Bei aller Bedeutung dieser zusammenfassenden Darstellungen der Fluoreszenzphänomene war eine einwandfreie Klassifikation derselben erst seit der interessanten Beobachtung Starks möglich, daß Benzol ultraviolette Fluoreszenz besitzt, und daß diese durch Einführung bestimmter Gruppen bis in das Gebiet des Sichtbaren verschoben werden kann. Durch Stark sowie R. Meyer u. a. ist die Fluoreszenz als eine gemeinsame Eigenschaft vieler Benzolderivate erkannt worden und dieser Befund ist von entscheidender Bedeutung für die Beziehungen zwischen Fluoreszenz und chemischer Konstitution.

Da nun, wie zahlreiche Untersuchungen gelehrt haben, gerade das Absorptionsspektrum einer in Ultraviolett selektiv absorbierenden Verbindung sich chemischen Veränderungen im Molekül gegenüber als be-

Digitized by Google

sonders empfindlich erweist, so war zu erwarten, daß ähnliches auch für das ultraviolette Fluoreszenzspektrum gelten würde; in der Tat ist das durch verschiedene Untersuchungen bestätigt, auch viele Fälle sichtbarer Fluoreszenz sind erst unter Berücksichtigung des ultravioletten Gebietes verständlich geworden, das auch an dieser Stelle eingehender zu betrachten ist.

6. Einfluß der Substituenten auf die Fluoreszenz der Benzolverbindungen. Wie sich das Absorptionsspektrum einer chemischen Verbindung (z. B. des im Ultraviolett absorbierenden Benzols) ändert, falls man andere Gruppen einführt, so reagiert auch das Fluoreszenzspektrum in empfindlicher Weise auf jede konstitutive Aenderung. Beschränken wir uns zunächst auf einfachere Substitutionsprodukte des Benzols, so wird durch jede Substitution der Charakter der Benzolfluoreszenz geändert, in der Regel verschmelzen die verschiedenen Banden zu einem einzigen Bande unter gleichzeitiger Verschiebung des ganzen Fluoreszenzspektrums nach Rot. Gruppen, die derartig wirken, kann man bathoflore nennen; es ist natürlich auch der Fall möglich, daß eine bestehende Fluoreszenz durch einen chemischen Eingriff nach kürzeren Wellen verschoben wird; derartige Gruppen sind als hypsoflore zu bezeichnen. Außer der Veränderung der spektralen Lage, d. h. der Fluoreszenzfarbe, verändert jede Substitution in der Regel auch die Intensitätsverteilung in der Fluoreszenzbande. Gruppen, die die Intensität vergrößern, mögen auxoflore, Gruppen, die die entgegengesetzte Wirkung ausüben, diminoflore, genannt werden.

Atomkomplexe, die eine bestehende Fluoreszenz am meisten beeinflussen und die sowohl eine bathoflore als auxoflore Wirkung ausüben, sind, wie gleich hervorgehoben werden möge, die auxochromen Amino- und Hydroxylgruppen, ferner die substituierten Komplexe, wie $NHCH_3$, $N(CH_3)_2$, OCH_3 usw.

Nun besteht hinsichtlich der Wirkung der Gruppen ein wesentlicher Unterschied, der sich genügend durch ihre chemische Natur erklärt, und durch den wieder die Beziehungen zwischen Fluoreszenz und Absorption hervortreten: die Einführung gesättigter Gruppen wie der Alkyle verstärkt die Intensität der Fluoreszenz, diese wirken somit als auxoflore Gruppen, während die Lage der Benzolfluoreszenz nicht wesentlich beeinflußt wird. Die Halogene bewirken ebenfalls nur geringe Verschiebung der Fluoreszenz, gleichzeitig aber eine Schwächung der Intensität, die mit dem Atomgewicht des Halogens vom Fluor zum Jod zunimmt.

Wesentlich anders ist die Wirkung ungesättigter Gruppen, als solche müssen OCH_3, NH_2, CN, $CH:CH_2$, die sämtlich auxoflor wirken, ferner die diminoflore Karboxylgruppe angesehen werden: in allen diesen Fällen werden die Fluoreszenz- (und konform damit auch die Absorptions-) Banden wesentlich nach längeren Wellen verschoben.

Schließlich soll noch erwähnt werden, daß bei Anwesenheit mehrerer Substituenten häufig ein additives Verhalten beobachtet ist; gleichzeitige Anwesenheit mehrerer ungesättigter Gruppen kann allerdings Anomalien hervorrufen. Auf eine derartige Anomalie möge hier noch aufmerksam gemacht werden:

Die Nitrogruppe gehört, worauf schon R. Meyer und H. Kauffmann aufmerksam machten, zu den Gruppen, die bei Einführung in ein fluoreszierendes System (z. B. aromatischen Kohlenwasserstoff) im allgemeinen die Fluoreszenz vernichten, was wohl mit den chromophoren Eigenschaften dieser Gruppe zusammenhängt; Nitrobenzol, Nitrotoluol u. a. zeigen keine Spur ultravioletter Fluoreszenz. Ebenso wirken NO_2-haltige Gruppen wie die Pikrylgruppe: $C_6H_2(NO_2)_3$. Um so auffälliger ist die Tatsache, daß es Nitroverbindungen gibt, die selbst im Sichtbaren äußerst starke Fluoreszenz aufweisen, wie Pikrylbiguanid und ähnliche Verbindungen, ferner m-Nitrodimethylanilin.

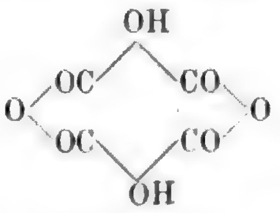
Es liegt nahe, derartige Effekte durch das Zusammenwirken der Nitrogruppe und der anderen (meist Amino-) Gruppen im Molekül durch Absättigung von Residualaffinitäten zu erklären, und es ist zu erwarten, daß man durch Untersuchung derartiger unerwarteter Fluoreszenzerscheinungen die Affinitätsäußerungen ungesättigter Gruppen erfolgreich wird studieren können.

Beispiele. 1. Als Beispiele sichtbar fluoreszierender Amino und Hydroxylverbindungen mögen die Amino- und Oxybenzoesäuren genannt werden. Die Benzoesäure besitzt schwache ultraviolette Fluoreszenz, durch Einführung einer Aminogruppe in o-Stellung wird die Strahlung in das sichtbare Gebiet gerückt.

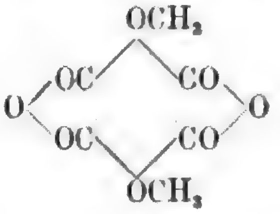
Die Hydroxylverbindungen der Benzoesäuren fluoreszieren besonders stark und im sichtbaren Gebiete in alkalischer Lösung; die Eigenschaft der Fluoreszenz ist somit den zweiwertigen Anionen o-$C_6H_4.O.CO_2''$ und m-$C_6H_4.O.CO_2''$ eigen.

Viele fluoreszierende Verbindungen leiten sich vom Hydrochinon ab, so Hydrochinondi- und -tetrakarbonsäure, ferner deren Ester, wie:

Von komplizierteren Verbindungen sei Hydrochinontetrakarbonsäureanhydrid

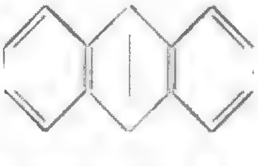


genannt, das sich mit gelber Farbe und roter Fluoreszenz löst, während der Ester

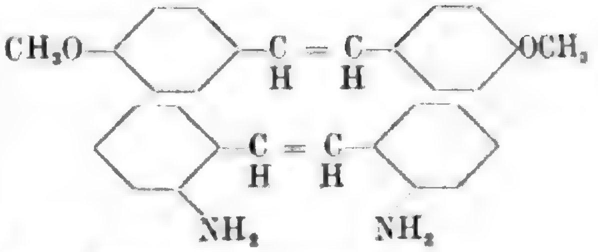


merkwürdigerweise keine Fluorescenz zeigt. In allen diesen Fällen werden die auxofloren Wirkungen der Amino- und Hydroxylgruppen durch die Karboxylgruppen oder die in ihnen enthaltenen ungesättigten C = O-Gruppen unterstützt; in der Reihe des Naphthalins und Anthracens vermögen Aminogruppen allein schon sichtbare Fluoreszenz hervorzurufen: α- und β-Naphtylamin fluoreszieren beide violett. Im Gegensatz zum Benzol liegen beim Naphtalin die Fluoreszenzbanden der Grenze des Sichtbaren sehr viel näher.

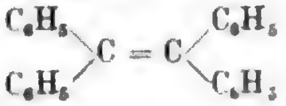
2. **Aethylenbindungen** können unter Umständen zu starker Fluoreszenz Veranlassung geben. Diese Bindungen können wir in Verkettung mit Benzolresten in den stark fluoreszierenden hochmolekularen Kohlenwasserstoffen, wie Anthracen:



annehmen, wahrscheinlich wird die Wirkung hier wie in anderen Fällen durch zyklische Anordnung wesentlich unterstützt. Fluoreszierende, die Aethylenbindung enthaltende Stoffe sind ferner Stilben, sowie die besonders von Elbs und seinen Schülern untersuchten Stilbenderivate:



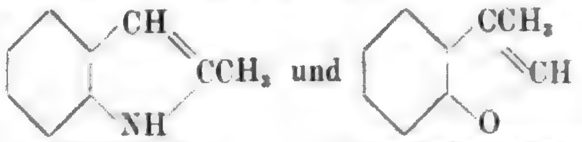
ferner Tetraphenyläthylen:



und Diphenylbutadien:

$C_6H_5CH = CH$
$|$
$C_6H_5CH = CH$

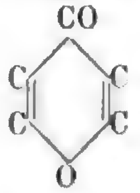
Kauffmann rechnet auch die Indole und Cumarone in diese Kategorie, z. B.:



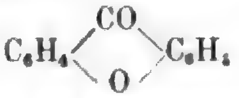
α-Methylindol und β-methylcumaron,

die die Aethylenbindung und die Auxochrome NH und O in zyklischer Bindung enthalten. Zweifellos bedingt in allen diesen Fällen der ungesättigte Charakter der Aethylenbindung die auxofloren Eigenschaften; denn Reduktion von RCH : CHR zu $RCH_2 - CH_2R$ hat fast durchwegs Verschwinden der sichtbaren Fluoreszenz im Gefolge.

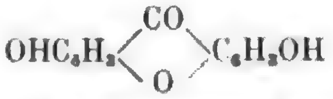
Besonders wirksam zeigt sich die Verbindung des Benzolrings mit dem Pyronring:



worauf auch von Stark und Meyer hingewiesen wurde. Benzophenon: $C_6H_5COC_6H_5$ fluoresziert im äußersten Ultraviolett (285 bis 380 $\mu\mu$) Xanthon:



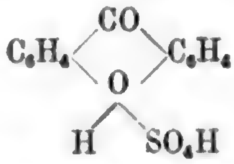
schon teilweise im sichtbaren (360 bis 430), während die Fluoreszenzbande des Dioxyxanthons:



fast völlig im Sichtbaren liegt (400 bis 470).

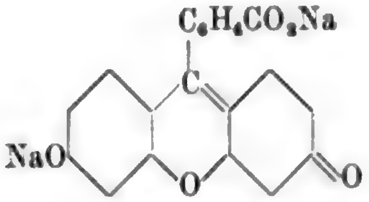
Die Pyron- und Xanthonderivate fluoreszieren besonders in Lösung von konzentrierter Schwefelsäure, in denen jedenfalls Sulfate wie:

Digitized by Google



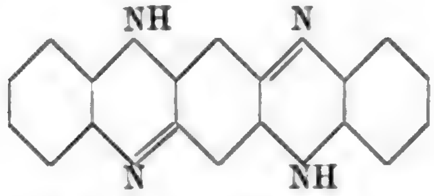
anzunehmen sind. Hier hat also Salzbildung den entgegengesetzten Effekt, wie bei der Aminobenzosäure.

Der Pyronring ist auch im Fluoreszein und diesem nahestehenden Verbindungen



anzunehmen, in denen zugleich noch eine p-chinoide Bindung vorhanden ist.

Eine große Zahl fluoreszierender Verbindungen enthält die Azomethingruppe .C = N. in zyklischer Bindung, so viele vom Acridin derivierende Basen, ferner das durch prächtige Fluoreszenz ausgezeichnete Fluorindin:

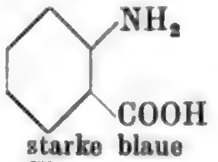


Weitere Beispiele findet man in der Zusammenstellung Kauffmanns.

3. Eine gesonderte Behandlung verlangt die Cyangruppe. Benzonitril C_6H_5.CN und Homologe, sowie α- und β-Naphtonitril $C_{10}H_7$.CN besitzen nach Messungen von Ley und v. Engelhardt sehr starke ultraviolette Fluoreszenz von etwa gleicher Intensität wie Anilin. Auch in Seitenketten cyansubstituierte Benzolderivate, wie Benzylcyanid $C_6H_5.CH_2.CN$ zeigen deutliche Fluoreszenz im Ultraviolett; Cyantriphenylmethan $(C_6H_5)_3C.CN$ fluoresziert äußerst stark; Dicyanstilben $C_6H_5.\underset{\mid\atop CN}{C}=\underset{\mid\atop CN}{C}.C_6H_5$ fluoresziert stärker als Stilben:

$$C_6H_5.\underset{\mid\atop H}{C} = \underset{\mid\atop H}{C}.C_6H_5$$

Man könnte daran denken, die Cyangruppe mit der Aminogruppe in Parallele zu stellen, d. h. in ihr eine kräftige auxoflore Gruppe zu sehen. Damit stimmt jedoch das Verhalten gewisser Verbindungen nicht überein, die außer der Cyangruppe noch andere Substituenten, z. B. die Karboxylgruppe enthalten, denn wir haben:



starke blaue Fluoreszenz.

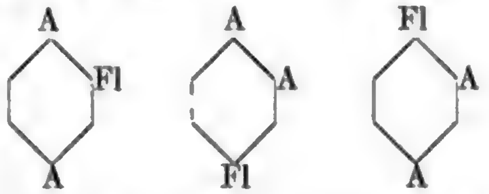
fluoresziert nicht oder äußerst schwach.

Nach Ansicht des Referenten ist die Annahme wahrscheinlicher, daß die Cyangruppe mit Aethylengruppen (die im Benzol, Naphtalin, Stilben usw. enthalten sind) ein neues fluorophores System bildet, etwa:

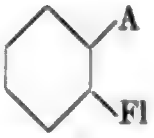
$$-C = C - C \equiv N$$

das durch Substituenten wie die Karboxylgruppe ähnlich beeinflußt wird, wie die in Benzolverbindungen vorhandenen Fluorophore.

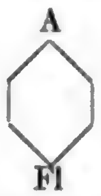
Wie bei den Beziehungen zwischen Farbe und Konstitution sind die auxochromen resp. auxofloren Gruppen besonders wirksam, wenn sie im Fluorophor, z. B. dem Benzolring, in bestimmter Anordnung vorhanden sind. Die hier erkannten Regelmäßigkeiten hat Kauffmann in seinem Verteilungssatz der Auxochrome zum Ausdruck gebracht. Sind 2 Auxochrome A (z. B. OH- und NH_2-Gruppen) und 1 Fluorogen Fl (z. B. —COOH) vorhanden, so tritt Fluoreszenz auf bei unsymmetrischer Verteilung, z. B. bei



Ist ein Auxochrom vorhanden, so ist häufig



fluoreszenzfähig, nicht aber



Es erscheint noch der Hinweis wichtig, daß das dem Benzol chemisch nahe stehende Pyridin sowohl als solches als auch in Form der Salze keine Spur ultravioletter Fluorezsenz aufweist, dagegen erscheint die Fluorezsenz durch Einführung einer Aminogruppe; α-Aminopyridin fluoresziert intensiv.

Die Fluoreszenzphänomene bei Naphtalin und seinen Derivaten bieten teils analoge, teils in gewisser Beziehung neuartige Erscheinungen, die in dem eigenartigen Ring-

systeme des Kohlenwasserstoffs (mit seiner charakteristischen schmalbandigen Fluoreszenz) begründet sind; so sind im Absorptions- und Fluoreszenzspektrum bei α- und β-substituierten Naphtalinderivaten charakteristische Unterschiede vorhanden.

7. Einfluß der Salzbildung auf die Fluoreszenz. In einigen Fällen (Karbonsäuren, Phenole, Amine) bewirkt Salzbildung typische Veränderungen der Fluoreszenzerscheinungen, die in der Regel zu Aenderungen im Absorptionsspektrum parallel gehen, häufig jedoch viel augenscheinlicher als diese die Natur der durch die Salzbildung vor sich gehenden innermolekularen Veränderungen erkennen lassen; es mögen diese Verhältnisse bei den aromatischen Aminen besprochen werden, wo sie besonders deutlich zutage treten.

Durch Salzsäurezusatz wird die Anilinfluoreszenz stark geschwächt und bei genügendem Säurezusatz verschwindet das typische Fluoreszenzband vollständig; die Benzol-Fluoreszenz-Banden erscheinen jedoch bei den bisherigen Versuchsanordnungen nicht, wahrscheinlich infolge sehr geringer Intensität des emittierten Lichtes. Weit charakteristischer sind die Erscheinungen bei α-Naphtylamin (Figur 3). Auf

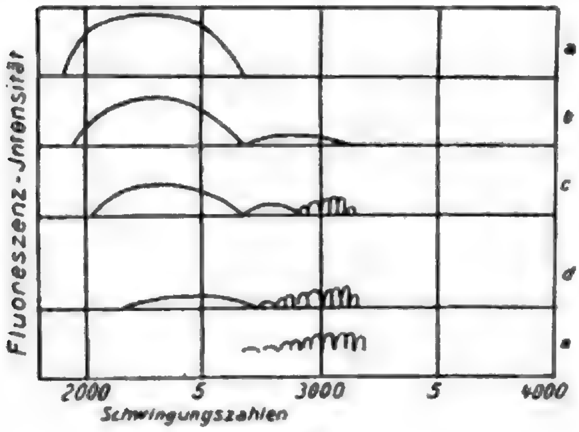


Fig. 3.

Zusatz von Salzsäure zur alkoholischen Lösung des Amins beobachtet man folgendes: Bei gleichen Molekülen von Säure und Base erfährt die breite Fluoreszenzbande des Amins (a), die teilweise im Violett liegt, eine geringe Verschiebung nach Ultraviolett neben einer deutlichen Schwächung ihrer Intensität; außerdem tritt bei ca. 2700 bis 3100 eine zweite Bande auf (b), die sich, wie Figur 3 zeigt, auf Zusatz einer größeren Menge Salzsäure (1 Mol. Amin: 10 Mol. Säure) in mehrere Einzelbanden auflöst, während die erste Bande zwischen 2000 und 2700 eine weitere Intensitätsschwächung erlitten hat. Ueberwiegt die Säure noch mehr, so tritt die Aminbande noch mehr zurück, während zwischen 2750 und 3160 neun Banden zum Vorschein kommen (d), die nach Gestalt und Intensitätsverteilung identisch sind mit den Naphtalinbanden (e); charakteristisch ist, daß die Banden beim Chlorhydrat gegenüber denen beim Kohlenwasserstoff eine deutliche Verschiebung nach Rot erlitten haben. Durch die Salzbildung wird die Aminogruppe gewissermaßen ausgeschaltet; sie wirkt nicht mehr wie eine ungesättigte reaktionsfähige Gruppe, sondern wie ein mehr indifferentes Radikal; das Salz verhält sich in optischer Beziehung ähnlich wie der Kohlenwasserstoff.

Die allmähliche Schwächung der Intensität der breiten Fluoreszenzbande durch Säurezusatz hängt zweifellos mit der allmählichen Zurückdrängung der Hydrolyse des Chlorhydrats:

$$C_{10}H_7NH_2HCl + H_2O \rightleftarrows C_{10}H_7NH_2H_2O + HCl$$

durch steigenden Säureüberschuß zusammen. Gleichzeitig mit dem Verschwinden jener Fluoreszenzbande tritt eine Verschiebung der Absorptionsbanden der aromatischen Amine nach Ultraviolett auf Säurezusatz ein.

In ähnlicher Weise wie bei den Aminen (durch Säurezusatz) scheint sich der hypsoflore Einfluß der Salzbildung bei den Karbonsäuren durch Zusatz von Alkali zu äußern.

8. Einfluß des Lösungsmittels auf die Fluoreszenz. Wie wiederholt festgestellt worden ist, ist die Lichtabsorption je nach der chemischen Natur des absorbierenden Stoffes mehr oder weniger vom Lösungsmittel abhängig. Am geringsten scheint dieser Einfluß bei den stark selektiv absorbierenden Kohlenwasserstoffen vom Typus des Benzols zu sein, weit größer ist er bei den auch chemisch reaktiveren Aminen.

Bekanntlich gilt für die Beeinflussung der Farbe durch das Lösungsmittel in manchen Fällen die sogenannte Kundtsche Regel, daß die Absorptionsstreifen um so mehr nach dem roten Ende verschoben werden, je stärker das Lösungsmittel für den betreffenden Absorptionsbereich dispergiert. Bei dem nahen Zusammenhange zwischen Absorption und Fluoreszenz lag es nahe, diese Regel auch für die Aenderung der Fluorescenz mit dem Lösungsmittel zu prüfen. Wie die Versuche ergaben, besitzt die Regel in manchen Fällen Gültigkeit, in anderen versagt sie ganz ähnlich wie bei der Absorption. Die Ausnahmen der Regel erklärt Wiedemann sachgemäß durch Berücksichtigung der chemischen Seite des Lösungsvorganges, daß nämlich Verbindungen, die der gelöste Stoff mit dem Lösungsmittel bildet (Hydrate, Alkoholate

Digitized by Google

usw.), die Dämpfung der im Lösungsmittel fluoreszierenden Moleküle in komplizierter Weise beeinflussen können.

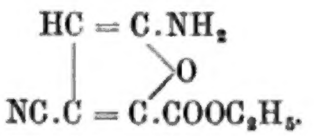
In einigen Fällen geht die Fluoreszenzfarbe (und damit die Lösungsfarbe) der Dielektrizitätskonstante des Lösungsmittels parallel, ohne daß aber durchwegs gültige Beziehungen vorhanden sind.

Stoffe, deren Fluoreszenz auffällig durch die Natur des Mediums verändert wird, sind gewisse Aminoverbindungen, besonders die häufig untersuchten Dimethylnaphteurhodin und Aminophenylaziminobenzol, die sich sehr gut zur Demonstration der Erscheinung eignen.

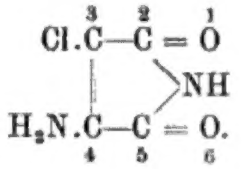
Dimethylnaphteurhodin		Aminophenylaziminobenzol	
Lösungsmittel	Fluoreszenzfarbe	Lösungsmittel	Fluoreszenzfarbe
Ligroin	grün	Chloroform	blauviolett
Aether	grüngelb	Aether	blau
Pyridin	gelb	Alkohol	blaugrün
Aethylalkohol	orange	Wasser	grün
Methylalkohol	rotorange	—	—

Neuerdings ist dieser Fluoreszenzwechsel mit dem Lösungsmittel auch bei stickstofffreien Verbindungen beobachtet worden; er ist z. B. deutlich bei Diphenylmaleinsäureanhydrid vorhanden. Ueber Temperatureinfluß vgl. den Artikel „Lumineszenz".

9. Fluoreszenz bei nichtaromatischen Verbindungen. Die Mehrzahl der fluoreszierenden Verbindungen leiten sich vom Benzol und höhermolekularen Kohlenwasserstoffen mit sogenannten kondensierten Benzolkernen ab. Jedoch ist das Benzol nicht das einzige fluoreszierende System, wie Beobachtungen bei Derivaten hydrierter Benzole und Pyridine, z. B. Succinylobernsteinester, Hydrocollidindikarbonsäureester u. a. beweisen. Eine Verbindung mit starker sichtbarer Fluoreszenz, die keinen Benzolkern enthält, ist der von W. Wislicenus dargestellte Aethylencyanidoxalester, dem nach Dieckmann die Konstitution eines Amino - cyan - furankarbonsäureesters zukommt:



Nach Ley und Fischer zeigen Derivate des Maleinsäureimids, die im Ultraviolett bis Violett selektiv absorbieren, deutlich grüne Fluoreszenz, die einfachste Verbindung dieser Art ist das Chlor-amino-maleinimid:



Für das Zustandekommen der Fluoreszenz ist neben der Aminogruppe wahrscheinlich die zwischen den Atomen 1 bis 6 liegende zweifache Konjugation der Doppelbindungen ausschlaggebend.

Besonderes Interesse verdienen neuere Beobachtungen von Stark und Gelbke, die die schon früher von Stark und Steubing gemachten Beobachtungen bestätigen und ergänzen, daß auch typische aliphatische und nicht zyklische Verbindungen mit bestimmter selektiver Absorption durch geeignete Lichtquellen zu sichtbarer und ultravioletter Fluoreszenz angeregt werden können. Zu diesen gehören Ketone, wie Aceton und Homologe, ferner Diketone, z. B. Diacetyl $CH_3.CO.CO.CH_3$ und verwandte Verbindungen und zwar besitzen diese übereinstimmend zwei Absorptions- und zwei Fluoreszenzbanden; von letzteren liegt die eine im Ultraviolett im Gebiete der kurzwelligen Absorptionsbande, die andere im Gebiete längerer Wellen. Bei Aceton liegen die Absorptionsmaxima bei ca. 360 und 280 $\mu\mu$ (das erste Band tritt erst bei sehr großen Schichtdicken auf und war bisher übersehen), die Fluoreszenzbanden bei 260 bis 320 und 325 bis 460 $\mu\mu$.

Entsprechend der von Stark vertretenen Ansicht über die Natur des Bandenspektrums sind die beiden Absorptionsbanden derartig gekoppelt, daß Absorption des Lichtes in der kurzwelligen Bande sowohl in dieser wie in der langwelligen Fluoreszenz im Gefolge hat, während kein wesentlicher Fluoreszenzeffekt zu beobachten ist, falls nur Licht in der langwelligen Bande zur Absorption gebracht wird. Durch Nichtbeachtung dieses Umstandes war bisher die Fluoreszenz des Acetons unbemerkt geblieben.

10. Fluoreszenz bei anorganischen Stoffen. Gegenüber dem ungeheuren Heere der fluoreszierenden organischen Verbindungen ist die Zahl der anorganischen Stoffe mit deutlicher Fluoreszenz bisherigen Beobachtungen zufolge nur klein. Auf die Fluoreszenz der Dämpfe von Quecksilber, Natrium, Kalium, Rubidium, von Jod u. a., sowie auf die bezüglichen Untersuchungen von Wiedemann, G. C. Schmidt und Wood wird im Artikel „Lumineszenz" hingewiesen. Die Fluoreszenz bestimmter Varietäten des Flußspates ist wahrscheinlich durch äußerst geringe Mengen einer Verunreinigung bedingt, die im Flußspat in Form einer festen Lösung vorhanden ist. Ziemlich starke Fluoreszenz weisen einige Uranylverbindungen und nach Soret auch einige Salze seltener Erden (Erbium, Didym, Lanthan u. a.) in Lösung auf.

11. Elektroatomistische Deutung der Fluoreszenzerscheinungen. Die Beobach-

tung, daß schon Stoffe von denkbar einfachster Konstitution, nämlich einatomige Gase wie Quecksilberdampf u. a. fluoreszenzfähig sind, weist darauf hin, daß es sich bei der Erscheinung um einen inneratomistischen Vorgang handeln wird und in der Tat sind alle Versuche die Fluoreszenz letzten Endes auf Grund von chemischen Umlagerungen oder Tautomeriephänomenen zu erklären, als gescheitert anzusehen. Die speziellen theoretischen Anschauungen über Fluoreszenz müssen im Artikel „Lumineszenz" nachgesehen werden; an dieser Stelle sollen nur die neueren Versuche berührt werden, Absorption und Fluoreszenz mit Hilfe einer elektroatomistischen Vorstellung dem Verständnis näher zu bringen, die gerade für den Chemiker besonderes Interesse beanspruchen. Auf den genetischen Zusammenhang zwischen Fluoreszenz und selektiver Absorption wurde schon früher hingewiesen. Letztere Eigenschaft wird chemisch durch die Existenz bestimmter Atomgruppierungen im Molekül des absorbierenden Stoffes zu erklären versucht, der sogenannte Chromophore z. B. der Gruppen C:O, CH:HC, N:N, N:O, u. a. (näheres s. im Artikel „Absorption"). An den Atomen derartiger chromophorer Gruppen nimmt nun Stark besonders bewegliche, sogenannte gelockerte Valenzelektronen an und betrachtet diese als Zentren der Emission und Absorption im Bandenspektrum. Bei der teilweisen Loslösung eines Valenzelektrons von seiner positiven Atomsphäre und der Wiedervereinigung werden Linien emittiert, die eine Doppelbande konstituieren, von denen die eine nach rot, die zugehörige Bande nach ultraviolett zu abschattiert ist. Die Absorption in kurzwelligen, nach rot abschattierten Banden ist allgemein von Fluoreszenz in diesen sowie in den mit ihnen verkoppelten langwelligen, nach Ultraviolett abschattierten Banden begleitet. Unter diesen Umständen wird somit ein Chromophor zugleich ein Fluorophor.

Literatur. *Neuere zusammenfassende Darstellungen:* **H. Kauffmann,** *Die Beziehungen zwischen Fluoreszenz und chemischer Konstitution (1906); enthält die wichtigeren älteren und neueren Arbeiten über sichtbare Fluoreszenz, soweit sie die chemische Seite des Problems betreffen.* — **Derselbe,** *Valenzlehre 1911.* — **H. Konen,** *in Kaysers Handbuch der Spektroskopie, Bd. IV (hier ist besonders die Literatur der sichtbar fluoreszierenden Verbindungen sehr eingehend berücksichtigt).* — **H. Ley,** *Zeitschrift für angewandte Chemie* 21, *2027, 1908.*

Ultraviolette Fluoreszenz: **J. Stark,** *Physikalische Zeitschrift* 8, *81.* — **J. Stark und Meyer,** *Physikalische Zeitschrift* 8, *250.* — **J. Stark,** *ebenda* 9, *85.* — **J. Stark und Steubing,** *ebenda* 9, *661.* — **J. Stark,** *Physikalische Zeitschrift* 10, *614.* — **Derselbe,** *Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik* 9, *15.* — **Gelbke,** *Physikalische Zeitschrift* 13, *584.* — **H. Ley und v. Engelhardt,** *Berl. Ber.* 41, *2988.* — **Dieselben,** *Zeitschrift für physikalische Chemie* 74, *1.* — **H. Ley und Gräfe,** *Zeitschrift für wissenschaftliche Photographie* 8, *294.* — *Siehe ferner die Zusammenstellung von* **P. Ruggli,** *Die Valenzhypothese von J. Stark vom chemischen Standpunkt. Sammlung chemischer und chemisch-technischer Vorträge 1912.*

H. Ley.

NOV 5 - 1915

G. Pätz'sche Buchdr. Lippert & Co. G. m. b. H., Naumburg a. d. S.

Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google